



# Analyse et caractérisation des phases sismiques régionales enregistrées par les antennes de capteurs

Estelle Schissele

## ► To cite this version:

Estelle Schissele. Analyse et caractérisation des phases sismiques régionales enregistrées par les antennes de capteurs. Géophysique [physics.geo-ph]. Université Nice Sophia Antipolis, 2002. Français. NNT : . tel-00653222

**HAL Id: tel-00653222**

**<https://theses.hal.science/tel-00653222>**

Submitted on 19 Dec 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**UNIVERSITE DE NICE-SOPHIA-ANTIPOLIS – UFR SCIENCES**

École doctorale de Sciences fondamentales et appliquées

**Thèse**

présentée pour obtenir le titre de

**Docteur en Sciences de l'Université de Nice-Sophia-Antipolis**

**Spécialité : Géophysique**

*par*

**Estelle SCHISSELE**

***ANALYSE ET CARACTERISATION  
DES PHASES SISMQUES REGIONALES  
ENREGISTREES PAR DES ANTENNES DE CAPTEURS***

***Soutenue publiquement le 12 novembre 2002, devant le jury composé de :***

Yves CANSI	Co-Directeur de thèse	LDG, Bruyères-le-Châtel
Olivier COUTANT	Examineur	LGIT, Grenoble
Stéphane GAFFET	Co-Directeur de thèse	Géosciences Azur, Nice
Jean-Louis LACOUME	Président – Rapporteur	LIS, Grenoble
Antonio ROVELLI	Rapporteur	INGV, Rome
Jean VIRIEUX	Directeur de thèse	Géosciences Azur, Nice

à 10h30, à Sophia-Antipolis

# AVANT-PROPOS

*Je tiens à remercier ici, tous ceux qui ont croisé ma route ces dernières années et qui ont contribué, d'une manière ou d'une autre, à mon travail.*

Je remercie tout d'abord Stéphane Gaffet, de m'avoir donné l'opportunité d'entreprendre cette thèse. Il a accepté de co-diriger mon travail et m'a confié à l'équipe '*Détection et Sismologie Opérationnelle*' du CEA, au sein de laquelle j'ai effectué ma thèse ces trois dernières années. Malgré la distance qui sépare Nice et Paris, je pense que nous avons réussi à collaborer étroitement, par des échanges fréquents (AirLib, 29 euros), qui m'ont été bien utiles et ce, tout au long de mon travail.

Merci à Yves Cansi, qui, au même titre que Stéphane, a co-dirigé cette thèse. Il a toujours fait preuve d'un grand intérêt concernant mon travail et je le remercie également pour sa disponibilité et la grande liberté qu'il m'a laissée dans les orientations que j'ai décidé de donner à ma thèse.

Merci à Bruno Feignier, qui m'a accueilli au sein de l'équipe '*Détection et Sismologie Opérationnelle*', lorsque j'ai débuté ma thèse. Je le remercie de m'avoir toujours accordé un peu de son temps, pourtant précieux, pour des discussions fructueuses concernant mon travail.

Merci à Jocelyn Guilbert pour les interactions et les conseils scientifiques ainsi que les critiques constructives dont il m'a fait part en lisant (et relisant encore !) mon manuscrit.

Je remercie ensuite Olivier Coutant, Jean-Louis Lacoume, Antonio Rovelli et Jean Virieux, de m'avoir fait l'honneur d'être dans mon jury de thèse.

Merci à Nicole Béthoux, Alain Gachon, Christophe Larroque et Antoine Schlupp pour les différents éclairages géologiques concernant la région d'Annot.

Merci à François Glangeaud pour la semaine « Séparation par matrice spectrale ».

Merci à toute l'équipe du *Norsar* pour son accueil chaleureux, inversement proportionnel à la température qu'il fait en *Norvège* au mois de décembre.

Je remercie également l'ensemble des personnes qui ont participé à l'installation des quatre antennes d'*Annot*, ainsi que les maires des communes *Méailles*, *Allons*, *Saint-Benoît* et *Ubraye*, d'avoir accepté le déploiement des antennes sur leurs communes, et ce durant deux mois.

Enfin, mes remerciements de cœur vont à toutes les personnes du Bâtiment Sables, qui ont partagé mon quotidien ces trois dernières années, et dont la chaleureuse ambiance de travail va bien me manquer. Merci aussi à Marion pour les longues conversations téléphoniques depuis *Santa Cruz*, à Estelle qui va, à son tour, présenter sa thèse dans quelques jours, à Bernhard pour les nombreux allers-retours à la fac de *Nice*. Merci à Bruno, Cédric, Gilles, Michael, Stéphane et Yannick, d'avoir participé à notre déménagement pour *Berlin* ... Et puis merci à tous les autres, qui ne sont pas cités ici, mais que je n'ai pas oublié ...

Merci à ma famille, qui a simplement su être là ... Merci à Frédéric...





# TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>9</b>
<b>CHAPITRE I .....</b>	<b>15</b>
<b><u>1. Les antennes sismologiques pour l'étude des ondes régionales</u> .....</b>	<b>15</b>
<b><u>1.1. L'outil antenne sismologique</u> .....</b>	<b>15</b>
<u>1.1.1. Historique</u> .....	15
<u>1.1.2. Quelles antennes déployer pour quelles ondes ?</u> .....	19
<u>Distance inter-capteur</u> .....	19
<u>Ouverture de l'antenne</u> .....	22
<u>Conditions expérimentales de terrain</u> .....	26
<u>Conclusions</u> .....	26
<u>1.1.3. Quelques exemples d'antennes sismologiques</u> .....	28
<u>Les antennes en L</u> .....	28
<u>L'antenne NORESS</u> .....	29
<u>L'antenne SPIRALE</u> .....	30
<u>1.1.4. Détermination expérimentale du domaine de validité d'une analyse en antenne</u> .....	33
<b><u>1.2. Les ondes régionales</u> .....</b>	<b>35</b>
<u>1.2.1. Où en sommes-nous dans la compréhension des ondes régionales ?</u> .....	35
<b><u>1.3. Modèle déterministe</u> .....</b>	<b>38</b>
<b><u>1.4. De l'utilité des antennes pour « décortiquer » la coda</u> .....</b>	<b>40</b>
<u>1.4.1. Les paramètres de propagation</u> .....	40
<u>1.4.2. Les applications des antennes à l'étude de la coda</u> .....	42
<u>1.4.3. Complexité de la coda : quelques illustrations</u> .....	44

## **CHAPITRE II ..... 49**

### **2. Méthodologie ..... 50**

#### **2.1. De la séparation d'ondes dans le domaine fréquentiel ... 51**

[2.1.1. La transformée de Fourier et ses limitations](#) ..... 51

[2.1.2. Les décompositions temps-fréquence](#) ..... 52

[Définition des grandeurs instantanées](#) ..... 52

[La transformée de Fourier à court-terme et le Spectrogramme.](#) ..... 55

[La transformée en Ondelettes et le Scalogramme.](#) ..... 56

[Illustration](#) ..... 57

[Les lignes de crêtes.](#) ..... 58

[La distribution de Wigner-Ville et ses versions lissées.](#) ..... 59

[Les méthodes paramétriques](#) ..... 62

[2.1.3. Discussions et Conclusions](#) ..... 62

#### **2.2. ... à la séparation d'ondes dans le domaine spatial. 65**

[2.2.1. Analogies temps-espace](#) ..... 65

[2.2.2. Les objectifs d'une décomposition en nombre d'onde](#) ..... 66

[2.2.3. Les différentes méthodes d'analyse en antenne](#) ..... 67

[Les formations de voies classiques](#) ..... 67

[Les méthodes haute-résolution](#) ..... 69

[2.2.4. Discussion et Conclusions](#) ..... 70

#### **2.3. Décomposition Temps-Fréquence-Nombre d'onde (TFK) 71**

[2.3.1. La sélection des zones temporelles: Décomposition en lignes de crêtes](#) ..... 73

[L'algorithme](#) ..... 73

[Mise en œuvre](#) ..... 74

[Localisation des lignes de crêtes](#) ..... 76

[Décomposition Temps-Fréquence globale](#) ..... 77

[Conclusions](#) ..... 80

[2.3.2. Décomposition en composantes orthogonales](#) ..... 82

[Estimation de la matrice spectrale](#) ..... 82

[Le filtrage par matrice spectrale](#) ..... 84

[L'algorithme MUSIC](#) ..... 98

[Validité des paramètres](#) ..... 102

[Principe de reconstruction des signaux](#) ..... 104

[Détermination du nombre de sources](#) ..... 108

[Analyse TFK et séparation d'ondes: Jusqu'où peut-on aller?](#) ..... 113

[Répartition énergétique](#) ..... 122

[Incertitudes sur les paramètres de propagation et Pouvoir de séparation](#) ..... 123

#### **2.4. Conclusions méthodologiques ..... 133**

## **CHAPITRE III ..... 133**

### **3. Application à l'analyse de signaux synthétiques ..... 137**

#### **3.1. Présentation des données synthétiques ..... 137**

3.1.1. Le milieu de propagation ..... 137

3.1.2. Méthode de calcul des sismogrammes synthétiques ..... 139

3.1.3. Les signaux ..... 139

#### **3.2. Résultats de l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde ..... 142**

3.2.1. Influence du nombre de vecteurs propres ..... 143

3.2.2. Influence des paramètres de calcul ..... 157

3.2.3. Bilan énergétique ..... 159

3.2.4. Inversion des paramètres de propagation ..... 161

3.2.5. Conclusions ..... 165

#### **3.3. Influence de la position de l'antenne ..... 167**

3.3.1. Le milieu de propagation ..... 167

3.3.2. Les signaux ..... 168

3.3.3. Analyse temps-fréquence-nombre d'onde ..... 169

3.3.4. Bilan énergétique ..... 173

3.3.5. Inversion des paramètres de propagation ..... 175

3.3.6. Conclusions ..... 176

#### **3.4. Influence du contenu spectral de la source ..... 177**

3.4.1. Résultats de l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde ..... 177

3.4.2. Bilan énergétique ..... 181

3.4.3. Inversion des paramètres de propagation ..... 184

#### **3.5. Conclusions ..... 186**

## **CHAPITRE IV ..... 185**

### **4. Application aux données réelles : L'expérience d'Annot ..... 190**

#### **4.1. L'expérience d'Annot ..... 191**

4.1.1. Le contexte géologique ..... 191

4.1.2. Le choix des sites ..... 193

4.1.3. Le jeu de données ..... 194

#### **4.2. Résultats des décompositions temps-fréquence-nombre d'onde ..... 198**

4.2.1. Stratégie de traitement ..... 200

Les signaux ..... 200

Décompositions temps-fréquence ..... 203

<u>Décomposition en nombre d'onde</u>	207
4.2.2. <u>Reconstruction des zones hétérogènes du milieu de propagation</u>	217
<u>Technique de reconstruction</u>	217
<u>Reconstruction du milieu à partir des observations globales</u>	221
<u>Relation entre les zones hétérogènes et les structures géologiques connues</u>	223
<u>Influence de la position de l'antenne</u>	227
4.2.3. <u>Influence de la position relative séismes-antennes sur la nature des phases diffractées</u>	231
4.3. <u>Conclusions sur l'étude des signaux réels</u>	238
<u>Estimateur de 'Retard-Somation'</u>	251
<u>Estimateur 'Haute-résolution'</u>	252
 <b>CONCLUSION GENERALE</b>	 <b>235</b>
<b>PERSPECTIVES</b>	<b>239</b>
<b>GLOSSAIRE MATHEMATIQUE</b>	<b>243</b>
<b>ANNEXE 1</b>	<b>246</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	<b>247</b>

# ***INTRODUCTION GENERALE***

Le caractère hétérogène de la croûte terrestre influence fortement la propagation des ondes et limite notre degré de compréhension de la répartition temporelle de l'énergie que présentent les sismogrammes régionaux.

La théorie des rais, associée à des modèles de croûte simples, permet de calculer les temps d'arrivées des principales phases régionales.

La mise en œuvre de simulations numériques de la propagation d'ondes en milieu homogène ou hétérogène 3D, permet d'aller plus loin et de calculer également les formes d'ondes associées à ces phases principales. La comparaison des signaux simulés avec les signaux réels enregistrés à la surface de la Terre affine sans cesse les caractéristiques du milieu de propagation.

Cependant, un sismogramme réel présente une complexité supplémentaire. Le champ d'onde direct,  $P$  et  $S$ , est suivi par une succession de phases, la coda du sismogramme, qui à elles seules peuvent dominer le bilan énergétique du sismogramme. A l'heure actuelle, les simulations numériques ne sont pas en mesure de reproduire l'intégralité de ce train d'onde.

Nous n'avons aujourd'hui qu'une connaissance incomplète des processus qui se mettent en place lors de la propagation d'un champ d'onde en milieu hétérogène. Du modèle de la diffraction simple à celui de la diffusion, différents régimes peuvent être envisagés pour décrire les phénomènes qui contribuent à la formation de la coda.

Les premières études destinées à « comprendre » la coda sont basées sur une approche statistique : la distribution des hétérogénéités dans le milieu de propagation est représentée de manière aléatoire et la décroissance d'énergie que présente la coda est une mesure du degré d'hétérogénéité moyen de la croûte terrestre.

Cependant, si ces processus diffusifs expliquent les arrivées tardives de la coda, caractérisées par des temps longs de propagation dans la croûte terrestre, ils ne suffisent pas à eux seuls à expliquer l'énergie présente dans la première partie de la coda  $P$  ou  $S$ .

## ***Quels sont alors nos objectifs ?***

Un de nos principaux objectifs est d'accroître notre capacité à décrire et à caractériser les phases qui composent la coda des sismogrammes régionaux. Un processus déterministe peut-il être invoqué pour expliquer la propagation de ces phases ?

L'outil « antenne sismologique » permet d'accéder à l'évolution spatio-temporelle de la déformation du champ d'onde au cours de sa propagation et est celui qui sera utilisé pour enregistrer les signaux régionaux. A partir de ces enregistrements multi-composantes du champ d'onde, les objectifs de ce travail sont une description fine et détaillée de l'évolution temporelle et fréquentielle des paramètres de propagation (azimut et vitesse apparente) associés à chacune des phases qui se propagent de façon cohérente à travers l'antenne. Cette description est importante car elle permet de relier chacune des phases présentes sur les enregistrements aux hétérogénéités du milieu de propagation.

Les deux grands thèmes qui ont été abordés durant cette thèse sont donc d'une part, la propagation des ondes régionales en milieu hétérogène et d'autre part, les antennes sismologiques en tant qu'outils d'observation de la déformation spatiale du champ d'onde. Dans le **chapitre I** de ce manuscrit, nous montrerons pourquoi les antennes sismologiques sont particulièrement bien adaptées pour « décortiquer » la coda des sismogrammes régionaux. Nous expliciterons également le modèle que nous avons adopté pour décrire l'ensemble des phases de la coda.

Le **chapitre II** est entièrement dédié à la méthodologie que nous avons mise en place pour décrire l'évolution temps-fréquence-azimut-vitesse des phases cohérentes du sismogramme. Les méthodes classiques qui décrivent une telle évolution ne permettent pas de décrire la présence simultanée de composantes ondulatoires de même contenu fréquentiel. Ce travail a permis de développer une méthodologie haute-résolution de la description des sismogrammes, mettant tout particulièrement l'accent sur la séparation de phases multiples. La méthode développée est basée sur l'algorithme *MUSIC*, dont les capacités en terme de séparation d'onde sont supérieures aux méthodes classiques d'analyse en antenne. Associée à cela, un critère original de sélection du nombre de phases sismiques présentes dans la même cellule temps-fréquence est mis en place, permettant d'ajuster plus finement la séparation.

Le **chapitre III** traite de la mise en application de la méthode temps-fréquence-nombre d'onde développée. Des signaux synthétiques résultants de la propagation d'un champ d'onde en milieu hétérogène sont ainsi analysés. Connaissant entièrement les caractéristiques du milieu de propagation,

nous sommes alors capables de comparer directement nos résultats avec ceux escomptés. Le pouvoir de résolution de la méthode que nous avons développée est de ce fait, clairement évalué.

Dans ce chapitre, nous étudions également l'influence mesurée de chaque diffracteur lorsque la distance entre le point d'enregistrement et la source varie dans le milieu de propagation.

Enfin, nous montrons comment les zones hétérogènes du milieu peuvent être caractérisées à partir de l'évolution temporelle des paramètres de propagation des différentes phases du signal.

Le **chapitre IV** décrit l'apport de notre travail dans l'analyse détaillée des sismogrammes régionaux. Les signaux étudiés sont ceux enregistrés lors de l'expérience d'*Annot*, d'avril à mai 1998, dans les Alpes de Haute-Provence, *France* (projet PNRN, co-financement INSU/CEA).

L'aspect novateur de cette expérience réside dans le fait d'avoir déployé quatre antennes de faible ouverture dans une zone géographiquement restreinte (distance inter-antenne  $\sim 10$  kilomètres).

Les objectifs principaux de cette expérience sont, la quantification des influences régionales (distance 10-50 kilomètres) et locales (distance  $< 10$  kilomètres) des principales structures hétérogènes (en terme de contraste d'impédance) du milieu de propagation. Les caractéristiques géologiques des sites sur lesquels chaque antenne a été déployée sont différentes (plateau sommital, fond de vallée, versant topographique), permettant ainsi également d'évaluer l'influence de la structure très locale du site d'enregistrement.

Les résultats de cette expérience confortent et complètent ceux obtenus lors de l'expérience de *Caille*, d'octobre 1994 à janvier 1995, dans les Alpes Maritimes, *France* (projet PNRN, 1994), où une forte influence régionale sur la forme du champ d'onde avait été mise en évidence.

La méthode de décomposition temps-fréquence-nombre d'onde développée est appliquée aux signaux enregistrés par les quatre antennes d'*Annot* et valide l'hypothèse d'un processus déterministe pour expliquer une certaine partie de la coda.

De plus, la comparaison de la nature des phases diffractées par le milieu, et enregistrées par chacune des antennes, nous permet d'évaluer la distance à laquelle se situent les diffracteurs qui ont influencé la propagation du champ d'onde. Une interprétation de la nature des structures (relief topographique, présence d'une faille, contraste sédiment/cristallin) ayant contribué à la constitution du champ d'onde est alors possible.

A partir d'une technique simple de reconstruction du milieu de propagation, basée sur une hypothèse de diffraction simple, l'influence de chacune de ces structures est évaluée lorsqu'on modifie la position de l'antenne dans le milieu de propagation et lorsque la position de l'hypocentre des séismes varie.





## ***CHAPITRE I***

### ***LES ANTENNES SISMOLOGIQUES POUR L'ETUDE DES ONDES REGIONALES***



# 1. Les antennes sismologiques pour l'étude des ondes régionales

## 1.1. L'outil antenne sismologique

### 1.1.1. Historique

On désigne par '*réseau sismique*', l'association de plusieurs capteurs déployés dans une région donnée. Alors qu'un capteur sismique isolé permet d'enregistrer uniquement l'évolution temporelle du mouvement du sol au passage d'une onde sismique, un réseau de capteurs enregistre également son évolution spatiale. Trois grands types de réseaux peuvent alors être distingués : les réseaux mondiaux, régionaux et locaux. La caractéristique principale qui distingue ces réseaux réside dans la distance maximale qui sépare les différents capteurs qui les composent ; cette distance est aussi appelée '*ouverture*' du réseau. Elle varie en fonction de la longueur d'onde des ondes auxquelles on s'intéresse. Plus cette longueur d'onde sera grande et plus il sera nécessaire d'augmenter l'ouverture du réseau. Autrement dit, plus l'ouverture d'un réseau est grande et plus les ondes qu'ils permettra d'analyser auront pénétré dans les couches profondes de la Terre.

Les réseaux mondiaux, comme *WWSSN* (World Wide Standardized Seismographic Network), ou régionaux, comme le réseau national français déployé par le *LDG*, constituent des réseaux dits de surveillance de la sismicité. Ils sont destinés à localiser les séismes à l'échelle de la Terre ou à l'échelle régionale. Cette localisation est obtenue à partir des temps d'arrivées des principales phases (*P,S*) contenues dans les signaux. Ces réseaux ne requièrent aucune configuration géométrique particulière mais une répartition homogène des capteurs autour de la zone épicentrale favorise néanmoins la précision de sa localisation. D'autres informations concernant alors soit la source elle-même du tremblement de terre (la géométrie du plan de faille qui a initié la rupture, le déplacement sur le plan de faille), soit le comportement du champ d'onde tout au long de sa propagation (imagerie d'une zone hétérogène à l'intérieur du globe terrestre) peuvent également être déduites des enregistrements que fournissent de tels réseaux. On travaillera alors soit directement à partir des temps d'arrivées des principales phases (tomographie des temps d'arrivées, Kissling, 1988 ; Dziewonski et al., 1984), soit à partir de l'atténuation des formes d'ondes (tomographie d'atténuation, Campillo et al., 1991), soit directement à partir des formes d'ondes présentes sur les sismogrammes (tomographie des formes d'ondes, Lambaré et al., 1992 ; Ribodetti et al., 2002).

Les réseaux locaux se distinguent des précédents par leur faible ouverture (quelques mètres à quelques dizaines de kilomètres) et par conséquent par une répartition dense des capteurs dans un espace restreint. Ce type de réseau est utilisé lorsque l'on s'intéresse à une zone particulière du globe

terrestre. Ainsi, ils peuvent par exemple être déployés lors d'une crise sismique pour l'étude de l'ensemble des répliques associées à un séisme majeur ou encore pour la surveillance d'une zone sismique.

Une '*antenne sismologique*' se distingue des réseaux classiques par une configuration géométrique structurée des différents capteurs qui la compose. Nous verrons dans la prochaine section en quoi la géométrie d'une antenne détermine entièrement son pouvoir de résolution ainsi que son domaine d'action. Le concept d'antenne sismologique fut d'abord introduit dans les années 1950 dans le cadre de la prospection géophysique, domaine dans lequel il continue d'ailleurs à être largement utilisé. Les antennes ainsi formées étaient alors unidimensionnelles dans ce sens que les capteurs étaient tous disposés selon une ligne droite. Le concept d'antennes bidimensionnelles fit sa première apparition grâce à la communauté d'experts qui se réunit à Genève en 1958 pour décider de la mise au point d'un système de détection efficace des essais nucléaires (Husebye et al., 1985). Il était alors clair que l'enregistrement des mouvements du sol permettrait cette détection et ceci à de très grandes distances de propagation de la source. Une antenne sismologique est d'autant mieux adaptée que la redondance de l'information enregistrée en différents points de l'espace permet, par sommation judicieuse des formes d'ondes présentes sur les sismogrammes, d'augmenter considérablement leur rapport signal sur bruit. Une forte cohérence doit cependant exister entre les différentes phases à l'échelle de l'antenne pour qu'une telle sommation puisse être efficace. Les antennes sismologiques sont donc des outils parfaitement bien adaptés à un des principaux objectifs du traité d'interdiction des essais nucléaires, à savoir, la détection d'événements de faible magnitude et ceci à de grandes distances de propagation. De plus, l'analyse des différences de temps d'arrivées des champs d'onde cohérents à l'échelle de l'antenne permet de mesurer leurs paramètres de propagation, c'est à dire leurs directions ainsi que leurs vitesses apparentes de propagation. Une identification des phases principales *P* et *S* contribuant au signal peut donc être faite. Si on considère de plus la différence entre les temps de propagation qui existent entre chacune de ces phases, une localisation de l'épicentre peut être donnée.

L'antenne *Yellowknife* (Canada) fut la toute première antenne bidimensionnelle (25 kilomètres d'ouverture) déployée par l'Angleterre, en collaboration avec le Canada. Les 19 capteurs composant cette antenne, toujours en fonctionnement aujourd'hui, sont disposés selon deux bras perpendiculaires, orientés selon deux directions privilégiées, de manière à favoriser la détection des événements sismiques localisés dans cette direction (voir 1.1.3). La détection des essais nucléaires était l'objectif principal de cette antenne. Les toutes premières observations permirent de mettre en évidence que ce type d'antenne sismologique est particulièrement bien adapté à l'augmentation du rapport signal sur bruit des événements sismiques de faible magnitude, ce qui conduit à diminuer le seuil de détection de ces événements.

Sur la base de ces observations, des moyens considérables furent engagés par les Etats-Unis dans le déploiement des toutes premières antennes de cette génération. *LASA* (*Large Aperture Seismic*

*Array*, Montana, Etats-Unis) ainsi que *NORSAR* (NORway Seismic ARray, Norvège) furent les deux grandes antennes construites à cette époque.

*LASA* était constitué de 525 capteurs répartis en 21 sous-antennes d'ouverture égale à 7 kilomètres chacune. Les antennes ainsi formées s'étendaient sur une surface globale de 200 kilomètres d'ouverture. Elles furent opérationnelles de 1965 à 1978 et leurs exploitations ont aujourd'hui été complètement arrêtées.

*NORSAR* fut construit parallèlement à *LASA* (début des années 1970) et profita donc du savoir-faire acquis durant l'installation de ce dernier. Le même type de configuration a été adopté avec cependant une réduction de son ouverture globale à 100 kilomètres. Aujourd'hui, seules 7 des 21 sous-antennes alors déployées sont encore opérationnelles.

Quelques années de fonctionnement continu de ces deux grandes antennes permirent d'enregistrer un important jeu de données. L'analyse de l'ensemble des données contribua en partie, à se réorienter vers des antennes d'ouverture beaucoup plus faible. Les premières antennes à large ouverture ont été construites dans le but de détecter et de localiser des événements de faible magnitude situés à distances téléseismiques. Les fréquences typiques de ces événements sont comprises entre 1 et 2 Hz et les antennes de large ouverture sont donc bien adaptées à leurs analyses. Cependant, ces dernières deviennent beaucoup moins performantes lorsqu'il s'agit de détecter et de localiser des événements situés à distance régionale, principalement caractérisés par des contenus spectraux plus haute fréquence. La grande distance qui sépare les différents capteurs composant une antenne de large ouverture ne permet plus d'observer une cohérence pour les fréquences caractéristiques des sismogrammes régionaux. Par exemple, du fait du manque de cohérence des signaux à l'échelle de l'antenne globale, l'utilisation d'une sous-antenne seule conduisait souvent à des meilleurs résultats en terme de détection, que l'utilisation de l'antenne complète formée par les 525 capteurs (Douglas, 2002). L'autre raison majeure de la réorientation qui fut donnée au déploiement de ces antennes est le coût démesuré qu'occasionnait la maintenance de systèmes d'une telle envergure.

L'ensemble de la géométrie des antennes à large ouverture fut alors reconsidéré et de nouvelles configurations proposées. Mykkeltveit (1984, 1985) montra que la configuration d'une antenne devenait optimale si une distance inter-capteur était présente de façon redondante, tout en échantillonnant les différentes directions de l'espace. Il montre que cette distance doit être supérieure à la distance de décorrélation du bruit, c'est à dire la distance à partir de laquelle plus aucune corrélation du bruit n'est observée entre deux capteurs quelconques de l'antenne. Le problème majeur est alors que cette distance de décorrélation est différente pour chaque bande de fréquence. Par conséquent, des distances inter-capteurs variables doivent être introduites dans l'antenne, de manière à lui permettre d'être optimisée pour l'analyse des signaux sismiques sur une large bande de fréquence. Suivant la fréquence d'analyse, on pourra alors former une sous-antenne en extrayant de l'antenne initiale des capteurs particuliers pour lesquels la distance inter-capteur est adaptée à la fréquence d'étude. Typiquement, les composantes basses fréquences du champ d'onde seront analysées avec les capteurs

les plus éloignés de l'antenne alors que l'analyse des hautes fréquences nécessitera de travailler avec des capteurs séparés par des distances plus faibles. C'est ainsi que *NORESS*, première antenne de deuxième génération fut déployé en 1979. Son ouverture a été réduite à 3km, avec une distance inter-capteur variant entre 100 et 1000 mètres. Suivirent alors également la mise en place de *ARCESS* (Norvège, 1987) et de *GERESS* (Allemagne, 1990), antennes basées sur le même type de configuration. Mykkeltveit et al. (1990) publient une synthèse relative aux capacités des antennes type *NORESS* à détecter les événements sismiques, identifier les principales phases et déterminer leurs paramètres de propagation de manière à pouvoir localiser la source de l'événement. Les performances des antennes de faible ouverture, en matière de localisation des événements sismiques, sont diminuées mais c'est alors l'utilisation conjointe de plusieurs antennes de ce type qui permet d'en améliorer la précision. Un des résultats de cette synthèse montre par exemple que *NORESS* a une probabilité égale à 0.9 en matière de détection d'un événement sismique si sa magnitude est comprise entre 2.5 et 2.7 et s'il est localisé à environ 1000 kilomètres.

Aujourd'hui les objectifs des antennes ont largement été diversifiés puisqu'elles ne sont plus seulement utilisées à des fins de détection. De nombreuses antennes sont installées de façon temporaire dans le but de comprendre la structure d'une région particulière du globe terrestre. C'est donc dans le but d'imager les structures hétérogènes présentes dans le milieu de propagation et de comprendre leurs interactions avec le champ d'onde que de telles antennes peuvent être déployées. C'est dans ce but que nous nous intéressons aux analyses en antenne et cet aspect sera développé en détail dans le chapitre II.

Une application directe d'une analyse en antenne est aussi celle qui vise à évaluer le risque sismique présent dans une région donnée. Ainsi, cela conduit à une meilleure compréhension de l'amplification ou de l'atténuation du champ d'onde lors de son interaction avec les structures géologiques majeures présentes dans le milieu. Les travaux réalisés par Tressols (1996) ont pu mettre en évidence, grâce à l'installation d'une antenne dans la vallée de Caille-Andon (Alpes de Hautes-Provence, France), qu'un champ d'onde incident peut s'y retrouver piégé. Les passages successifs du champ d'onde à travers l'antenne ont ainsi été détectés selon des directions géographiquement opposées. Ces passages successifs sont interprétés comme la diffraction du champ d'onde incident  $P$  sur chacun des bords de la vallée. Des conversions en ondes de surface furent observées. Ce phénomène augmente considérablement la durée du sismogramme et donc l'énergie enregistrée en un point de l'espace. De tels effets peuvent alors avoir des conséquences dramatiques sur l'ensemble des habitations présentes dans la vallée en cas de forts séismes. Contrairement aux techniques classiques du type H/V, une analyse en antenne permet donc non seulement de quantifier un effet de site mais également de caractériser les effets de propagation bidimensionnels du champ d'onde. Cornou (2002) a confirmé ce résultat par l'étude des champs d'ondes sismiques locaux qui se propagent dans la vallée de Grenoble.

Nous citerons enfin un dernier domaine d'étude dans lequel les antennes sont aujourd'hui de plus en plus utilisés : c'est le domaine de la volcanologie. Dans ce cadre-là, elles apportent des informations primordiales, tant en terme d'identification et de caractérisation de structures, qu'en terme de localisation des différentes sources générant des ondes sismiques. Les volcans sont des édifices très complexes où siège une forte activité sismique. L'accroissement de cette activité est un excellent indicateur de la proche entrée en éruption du volcan. L'installation d'une antenne sur les flancs d'un volcan permet de suivre cette activité. L'analyse des signaux complexes qui y sont enregistrés accroît notre compréhension des phénomènes physiques qui conduisent à une éruption volcanique. De plus, les antennes sont également utilisés pour la localisation des sources qui génèrent les signaux sismiques enregistrés. L'utilisation conjointe de plusieurs antennes peut donner une localisation de la chambre magmatique du volcan et permet alors de suivre son déplacement ascendant vers la surface de la Terre (Wassermann et al., 2001 ; Almendros et al. 2002).

### **1.1.2. Quelles antennes déployer pour quelles ondes ?**

La configuration géométrique d'une antenne sismologique est directement liée au type d'onde que l'on souhaite observer. Les paramètres essentiels qui interviennent sont :

- le nombre de capteurs utilisés pour construire l'antenne
- la distance inter-capteur minimale, qui est aussi la distance minimale qui sépare deux capteurs adjacents de l'antenne.
- l'ouverture globale de l'antenne
- les conditions expérimentales de terrain

Lors de la conception de la configuration géométrique d'une antenne, le nombre de capteurs est habituellement fixé et ce paramètre ne sera donc pas discuté ici. Néanmoins, la capacité d'une antenne, en terme de détection et de pouvoir de résolution, augmente avec le nombre de capteurs utilisés pour la construire.

#### ***Distance inter-capteur***

Pour mieux comprendre les limitations induites par la configuration géométrique d'une antenne sur le type d'onde qu'elle sera capable de décrire, un parallèle avec l'échantillonnage temporel peut être mené. En effet, un capteur sismologique qui numérise l'évolution des mouvements du sol en fonction du temps présente une réponse impulsionnelle qui lui est propre et qui définit la gamme de fréquence plus ou moins large des ondes qu'il sera capable de décrire sans en dégrader les principales caractéristiques. Une antenne sismologique permet d'accéder à un échantillonnage spatial du champ d'onde. La distance qui sépare les différents capteurs dans le domaine spatial est équivalente au temps

qui sépare deux échantillons dans le domaine temporel. Un minimum de deux points d'échantillonnage spatial est nécessaire par longueur d'onde pour décrire correctement un champ d'onde qui se propage à travers une antenne (d'après le théorème de Shannon). Si  $\Delta x$  est la distance qui sépare deux capteurs adjacents de l'antenne, le nombre d'onde maximal que l'on peut prétendre analyser avec cette antenne est égal à  $1/2\Delta x$ . Tout ceci est entièrement inscrit dans la réponse impulsionnelle de l'antenne ainsi que dans sa fonction de transfert. Cette réponse impulsionnelle se définit par la fonction :

$$f(x, y) = \sum_{\vec{r}} \delta(x - x_{\vec{r}}) \delta(y - y_{\vec{r}})$$

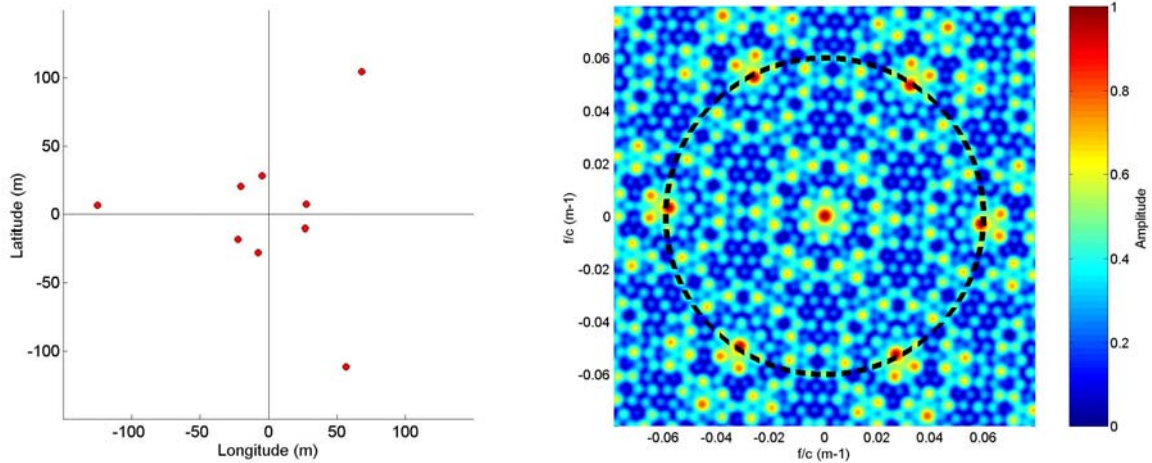
Éq. 1-1

$(x_{\vec{r}}, y_{\vec{r}})$  sont les coordonnées de chaque capteur constituant l'antenne dans un repère géographique. La transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle dans l'espace des nombres d'onde permet de calculer la fonction de transfert  $FT(\vec{k})$  de l'antenne, définit par :

$$FT(\vec{k}) = \sum_{\vec{r}} f(x, y) \cdot \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r})$$

Éq. 1-2

où  $\vec{k}$  est le vecteur nombre d'onde. La fonction de transfert est en fait la réponse de l'antenne à la propagation d'un signal impulsionnel qui se propagerait avec une vitesse apparente infinie. Un exemple est montré **Fig. 1-1** où on a représenté la configuration géométrique de l'une des antennes déployées à *Annot* (Alpes de Hautes-Provence, France) durant les mois d'avril-mai 1998 ainsi que la fonction de transfert associée.



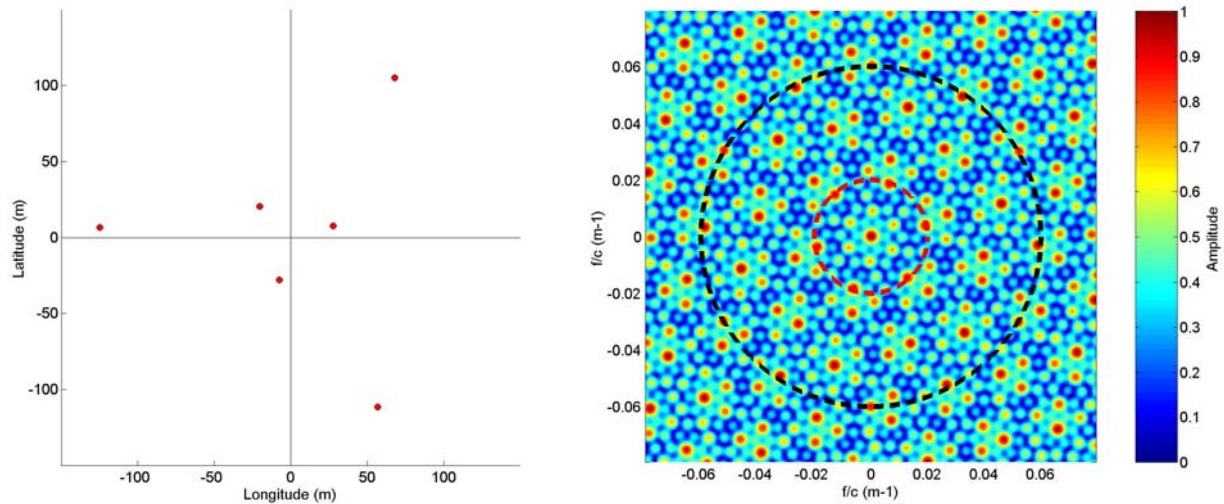
**Fig. 1-1 : Configuration géométrique de l'une des antennes déployées à *Annot* (à gauche). Fonction de transfert de l'antenne *Annot* (à droite). Le cercle pointillé marque la localisation des lobes secondaires de la fonction de transfert.**



L'antenne ainsi déployée était composée de neuf capteurs et présentait une ouverture égale à 250 mètres. Ces capteurs sont disposés au sommet de trois triangles équilatéraux qui, par rapport au centre du dispositif, ont subi une rotation d'angle respectif égal à  $+60^\circ$ ,  $+18^\circ$  et  $-18^\circ$ . La distance minimale entre deux capteurs adjacents est égale à 17 mètres.

La fonction de transfert de l'antenne est caractérisée par la présence d'un lobe central ainsi que par celle de lobes secondaires, dus à la périodisation du spectre en nombre d'onde, elle-même induite par l'échantillonnage spatial. Ces lobes secondaires sont localisés sur un cercle de rayon  $k = 0.06m^{-1}$  (cercle pointillé noir, **Fig. 1-1**). Le nombre d'onde maximal que l'on sera capable d'analyser avec cette antenne est égal à celui qui se situe à mi-distance entre le lobe central et un des lobes secondaires ( $k_{\max} = 0.03m^{-1}$ ), ce qui est en accord avec le nombre d'onde maximal calculé à partir de la distance minimale entre deux capteurs adjacents (1/34). Une autre façon de voir les choses est de considérer que la propagation d'une onde plane à travers l'antenne, caractérisée par un vecteur de propagation  $\vec{k}_0$ , se traduit, dans l'espace des nombres d'onde, par un produit de convolution entre la fonction de transfert de l'antenne et un dirac positionné en  $\vec{k}_0$ . Tout se passe alors comme si la fonction de transfert de l'antenne subissait une translation de vecteur  $\vec{k}_0$  dans l'espace des nombres d'onde. Si  $\|\vec{k}_0\|$  est supérieur à  $k_{\max}$ , le lobe principal de la fonction de transfert se translate d'une valeur supérieure à  $k_{\max}$  et c'est alors le nombre d'onde correspondant à la position de l'un des lobes secondaires qui sera retenu comme étant celui qui caractérise la propagation de façon optimale.

Dans le but d'établir un lien entre la distance inter-capteur minimale et le domaine des nombres d'onde que l'on peut prétendre analyser avec une antenne, la fonction de transfert a été recalculée en conservant l'ouverture de l'antenne déployée à *Annot* mais en supprimant un capteur sur deux dans la partie centrale du dispositif. Les résultats sont présentés **Fig. 1-2** où on observe que les amplitudes des lobes secondaires, qui étaient déjà visibles sur la fonction de transfert initiale, se sont considérablement renforcées.



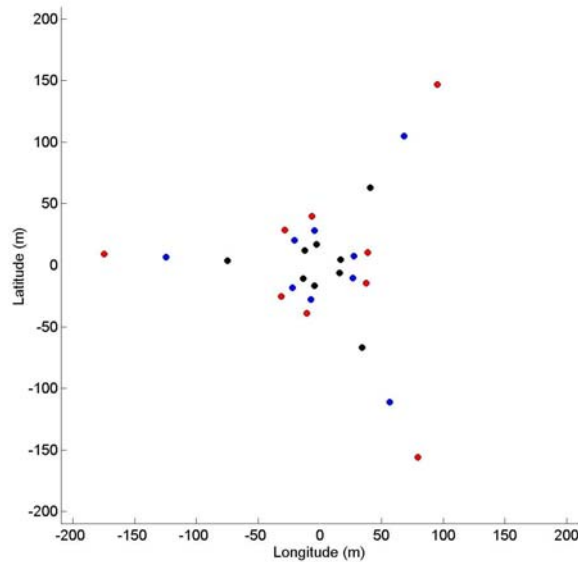
**Fig. 1-2 : Antenne dont la configuration géométrique a été déduite de celle déployée à *Annot*. Le nombre de capteurs a été réduit à six, en supprimant un capteur sur deux dans la partie centrale du dispositif (à gauche). Fonction de transfert associée (à droite). Le cercle pointillé rouge représente la position des lobes d'aliasing pour cette antenne. Le cercle pointillé noir représente la position des lobes secondaires associée à la fonction de transfert de l'antenne *Annot* dans sa position initiale.**

L'augmentation de la distance minimale entre deux capteurs adjacents a donc pour effet de diminuer l'étendue du domaine en nombres d'onde qu'on peut observer avec une antenne, puisque dans le cas présent, ce nombre d'onde a été réduit à  $0.01m^{-1}$ . Sur la **Fig. 1-2**, le cercle noir représente la position des lobes secondaires lorsque l'on considère l'antenne *Annot* dans sa configuration initiale. Le cercle rouge représente la position des lobes secondaires lorsqu'un capteur sur deux a été supprimé au centre du dispositif.

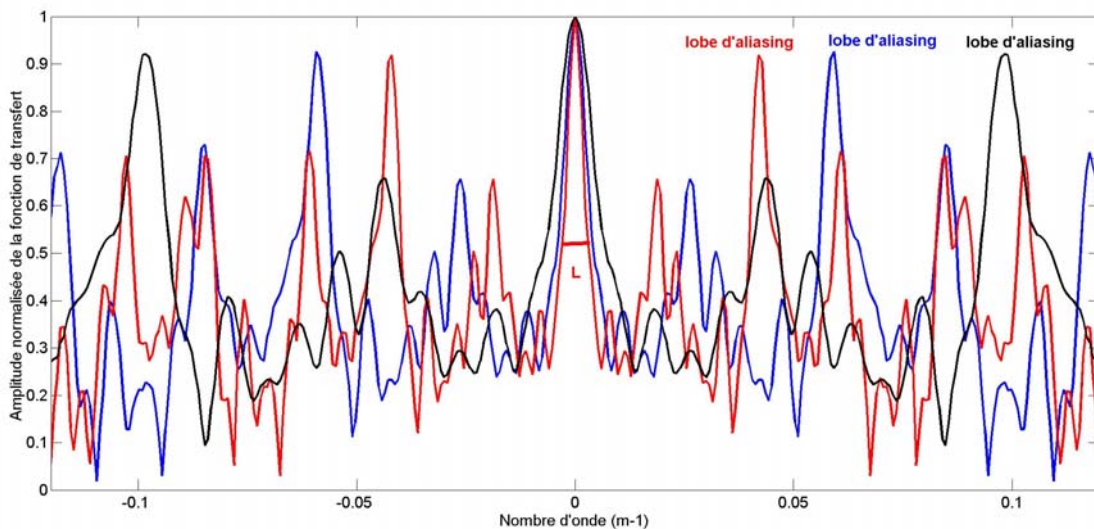
### ***Ouverture de l'antenne***

Un autre paramètre qu'il est important de prendre en compte lors de l'élaboration de la configuration géométrique d'une antenne est son ouverture. Lorsque de nombreuses composantes ondulatoires sont contenues simultanément dans les signaux sismiques et que ces composantes sont caractérisées par des nombres d'onde différents, il devient possible, par transformation de Fourier dans l'espace des nombres d'ondes, de les séparer. Le déploiement des signaux dans cet espace sera alors caractérisé par la présence de plusieurs lobes, résultant de la convolution de la fonction de transfert avec chacun des dirac positionnés aux différents nombres d'onde qui gouvernent la propagation. Si la différence qui sépare ces nombres d'onde est supérieure à la largeur à mi-hauteur du lobe principal, la séparation dans l'espace des nombres d'onde devient possible. Il est aisé de comprendre que lorsque la largeur du lobe central diminue, la séparation en nombres d'onde sera favorisée. La largeur de ce lobe dépend directement de l'ouverture de l'antenne. La fonction de transfert de l'antenne déployée à *Annot* a été recalculée en lui appliquant des homothéties de rapport 0.6 et 1.4. L'ouverture de l'antenne a ainsi été respectivement diminuée et augmentée, tout en laissant inchangée sa configuration géométrique. La **Fig. 1-3** représente l'antenne *Annot* pour des homothéties de rapport 0.6 (*en noir*), 1

(en bleu) et 1.4 (en rouge). Les fonctions de transfert correspondantes aux différentes antennes ainsi construites ont été calculées et on a représenté sur la Fig. 1-4 des coupes radiales à travers ces fonctions de transfert.  $L$  représente la largeur à mi-hauteur pour l'antenne ayant la plus grande ouverture. On observe que lorsque l'ouverture diminue, la largeur à mi-hauteur du lobe central augmente. Donc, plus une antenne est étendue et plus la séparation de composantes ondulatoires caractérisées par des nombres d'onde voisins est favorisée.



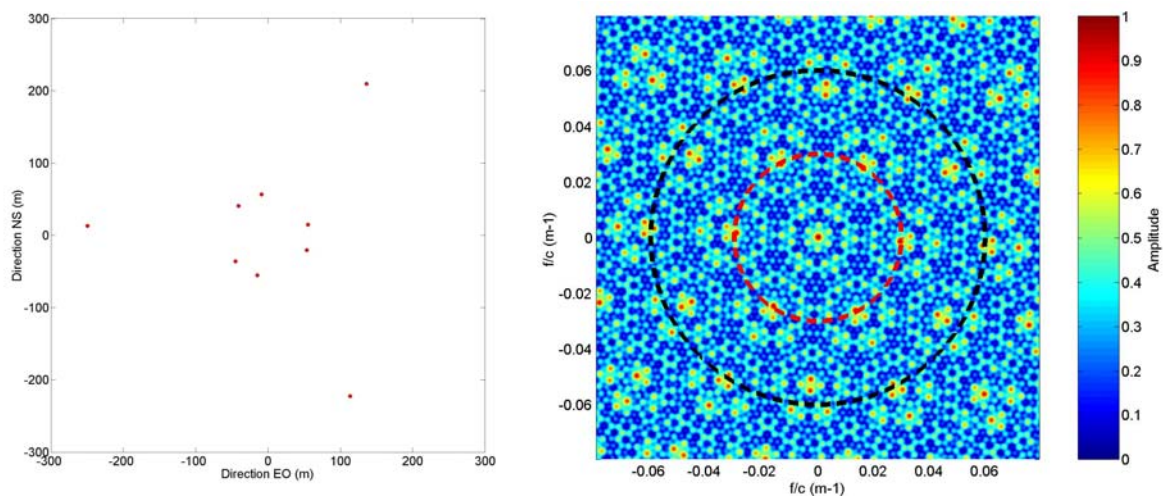
**Fig. 1-3 :** L'antenne *Annot* dessinée à différentes échelles : échelle initiale - (bleu), échelle multipliée par un facteur 0.6 - (noir), échelle multipliée par un facteur 1.4 (rouge).



**Fig. 1-4 :** Coupes radiales à travers la fonction de transfert pour les différentes antennes représentées sur la Fig. 1-3. Echelle initiale - (bleu), échelle multipliée par un facteur 0.6 - (noir), échelle multipliée par un facteur 1.4 (rouge).

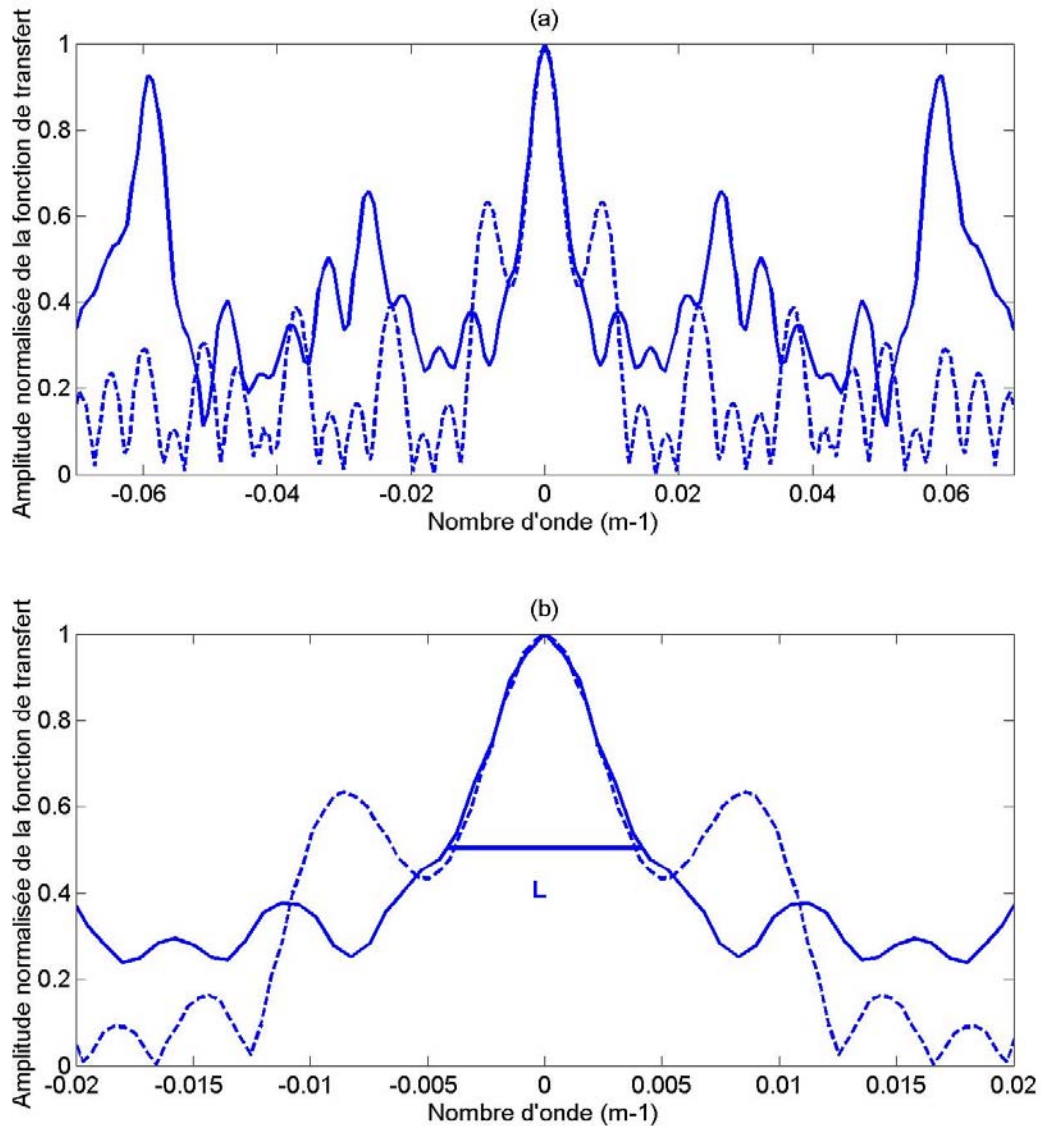
D'un autre côté, on observe également que lorsqu'on augmente l'ouverture de l'antenne, tout en gardant constant le nombre de capteurs, on réduit le domaine d'étude en nombre d'onde. La fonction de transfert de l'antenne *Annot* est représentée sur la Fig. 1-5 en ayant doublé l'ensemble des distances inter-capteurs. Le cercle noir correspond à la localisation des premiers pics secondaires de la fonction de transfert de l'antenne dans sa configuration géométrique initiale. Le cercle rouge représente cette localisation lorsque l'ouverture a été multipliée par deux. On a diminué de moitié le domaine de validité de l'analyse en nombre d'onde.

Cette dernière observation peut également être faite à partir de la Fig. 1-4, où on montre que lorsque l'ouverture de l'antenne augmente, les premiers lobes d'aliasing se rapprochent de plus en plus du lobe central.



**Fig. 1-5 : Antenne déduite de celle d'*Annot* après avoir doublé l'ouverture initiale (à gauche). Fonction de transfert associée (à droite).**

Dans le cas de l'antenne utilisée à *Annot*, un zoom sur la partie centrale d'une coupe radiale à travers la fonction de transfert montre que la largeur à mi-hauteur du lobe central est en moyenne égale à  $L = 0.009m^{-1}$  (Fig. 1-6). En théorie, tous nombres d'ondes séparés par une distance supérieure à  $L$  pourront être séparés par une décomposition en nombres d'onde. En pratique, lorsque plusieurs ondes se propagent simultanément à travers l'antenne, la décomposition en nombre d'onde résultante est obtenue par sommation des fonctions de transfert centrées sur chacun des diracs caractérisant la propagation de chacune des ondes contenues dans le signal. Selon la position relative de ces diracs, la sommation de l'ensemble des fonctions de transfert peut conduire à rendre prépondérante l'énergie des lobes secondaires par rapport à celle des lobes principaux. Les vecteurs nombres d'onde seront alors mal estimés. Il est donc important qu'entre le lobe central et les lobes secondaires, la fonction de transfert prenne des valeurs d'énergies moyennes aussi faible que possible.



**Fig. 1-6 : (a) Coupes radiales à travers la fonction de transfert (trait plein : N30°, trait pointillé : N60°) de l'antenne *Annot* dans sa configuration initiale (Fig. 1-1). (b) Zoom sur la partie du lobe central de la coupe représentée en (a). *L* représente la largeur à mi-hauteur du lobe central.**

Si cette amplitude moyenne est trop forte, le risque de retenir des nombres d'ondes résultant d'interférences constructives de lobes secondaires, lors de propagations simultanées, augmente considérablement.

Pour l'antenne déployée à *Annot*, on observe sur la Fig. 1-6 que pour les nombres d'ondes compris entre  $-0.03$  et  $0.03\text{m}^{-1}$ , la fonction de transfert prend des valeurs qui sont globalement faibles, inférieures à 40% de son maximum. On observe également que la fonction de transfert présente une anisotropie azimutale puisque dans certaines directions, pour les nombres d'ondes égaux à  $0.025\text{m}^{-1}$ , la fonction de transfert peut prendre des valeurs fortes, proches de 70% de son maximum. Pour ces valeurs-là de nombre d'onde, le risque de les interpréter comme des nombres d'ondes correspondants à

la propagation réelle d'une phase devient grand. Il sera donc nécessaire de mettre en place un système de vérification, *a posteriori*, de la validité des résultats trouvés par la décomposition en nombre d'onde. La valeur moyenne des fluctuations du bruit de fond de la fonction de transfert diminue lorsque l'ouverture de l'antenne augmente.

### ***Conditions expérimentales de terrain***

L'homogénéité du substratum sur lequel l'antenne est déployée est un paramètre qu'il est important de prendre en compte lors de son installation. L'efficacité d'une analyse en antenne repose sur la bonne cohérence des formes d'ondes enregistrées par les différents capteurs. Il est donc important d'éviter la présence d'effets locaux propres à chaque site d'enregistrement et qui viendrait perturber les observations. Lorsque l'ouverture de l'antenne augmente, il devient de plus en plus difficile de respecter cette condition. De plus, il est également préférable que la surface sur laquelle repose l'antenne soit plane. En effet, les paramètres de propagation des différents champs d'onde qui traversent l'antenne seront retrouvés en considérant les différences de propagation de ces champs d'onde d'un capteur à un autre. Si ces différents capteurs reposent sur une topographie très irrégulière, des corrections temporelles tenant compte de la différence d'altitude d'un capteur à un autre devront être apportées de manière à ne pas introduire de biais sur l'estimation des paramètres de propagation.

### ***Conclusions***

La configuration géométrique d'une antenne dépend tout d'abord des informations que l'on cherche à extraire des sismogrammes. La gamme de fréquence des ondes auxquelles on s'intéresse ainsi que leurs vitesses de propagation à travers l'antenne sont les paramètres primordiaux qu'il est nécessaire de déterminer avant toute étude. Ce sont ces paramètres qui vont nous orienter dans le choix de la configuration géométrique de l'antenne.

Les paragraphes précédents nous ont permis de comprendre que l'antenne idéale est celle pour laquelle :

- (1) la fonction de transfert présente des lobes secondaires d'aliasing situés le plus loin possible du lobe central dans le domaine des nombres d'ondes.
- (2) la fonction de transfert présente un lobe central de faible largeur à mi-hauteur. Plus ce lobe sera fin et plus la séparation de nombres d'onde voisins sera favorisée.
- (3) la fonction de transfert présente une amplitude moyenne la plus faible possible, de manière à réduire l'amplitude des pics d'interférences dans la décomposition en nombre d'onde, dus à la propagation de composantes ondulatoires multiples et simultanées.
- (4) le substratum sur lequel elle repose est plan et homogène.

Lorsque l'ouverture de l'antenne augmente, (2) et (3) sont favorisées au détriment de (1) et (4). Lorsque la distance inter-capteur minimale diminue, c'est (1) qui est favorisé.

Les différentes conditions énoncées ci-dessus sont donc en opposition, à savoir qu'on ne peut pas, avec un nombre de capteurs préalablement fixé, augmenter indéfiniment l'ouverture de l'antenne tout en diminuant la distance qui sépare deux capteurs adjacents. Par conséquent, une configuration géométrique parfaite, répondant simultanément à tous les critères et rendant ainsi la fonction de transfert optimale, n'existe pas et un compromis doit être trouvé pour satisfaire au mieux possible toutes les contraintes exposées ci-dessus. Ce compromis est largement guidé par le type d'onde auxquelles on s'intéresse.



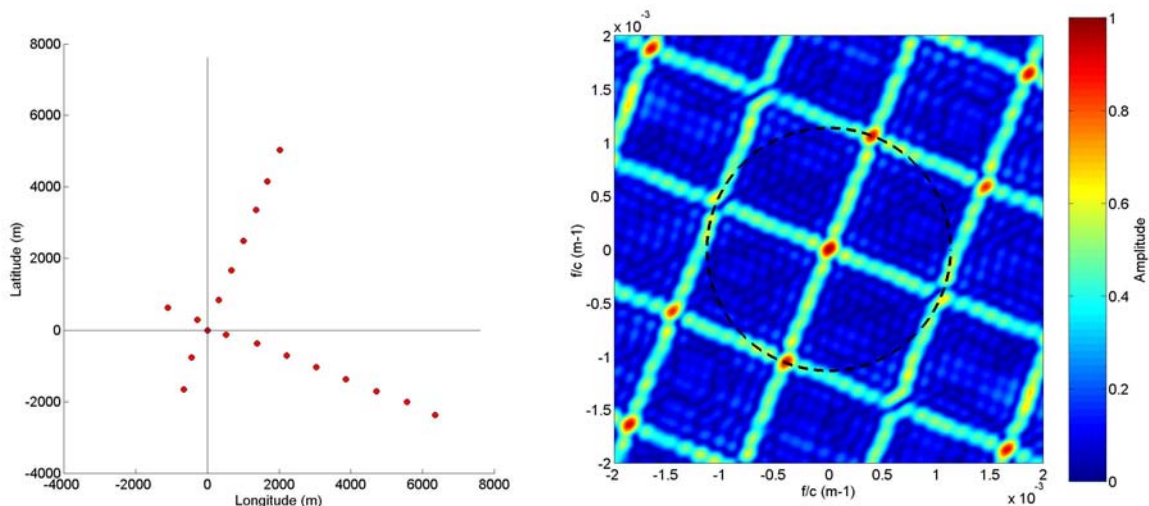
### 1.1.3. Quelques exemples d'antennes sismologiques

Quelques exemples d'antennes sismologiques, permettant chacune d'explorer des domaines de nombre d'onde plus ou moins vastes, et donc des gammes de fréquences et de vitesses différentes, sont présentés ci-dessous.

#### *Les antennes en L*

Localisation géographique	55.3 N, 3.1 W, Angleterre
Nombre de capteurs	19
Ouverture	8.5 kilomètres
Distance inter-capteur minimale	800 mètres
$k_{max}$	$0.0006 \text{ m}^{-1}$

Ces antennes sont caractérisées par une configuration géométrique bien particulière qui consiste à déployer les différents capteurs selon deux lignes droites, formant ainsi une géométrie que nous appellerons en L (**Fig. 1-7**). Cinq réseaux de ce type ont été déployés à la surface de la Terre (dont *Yellowknife*, Canada, 1.1.1). Chacun des bras sont orientés vers des zones bien précises, ce qui favorise la détection des événements se propageant selon ces directions. La principale motivation qui a conduit à déployer ce type d'antenne est la détection des explosions nucléaires. Le fait d'avoir introduit une distance redondante dans la conception de l'antenne permet de mettre en œuvre de nombreuses techniques nécessitant l'utilisation de lissages spatiaux (voir chapitre II).



**Fig. 1-7 :** Configuration géométrique de l'antenne *Eskaldemuir* (Angleterre) (à gauche). Fonction de transfert associée (à droite). Le cercle pointillé noir représente la position des premiers lobes d'aliasing dans l'espace des nombres d'onde.



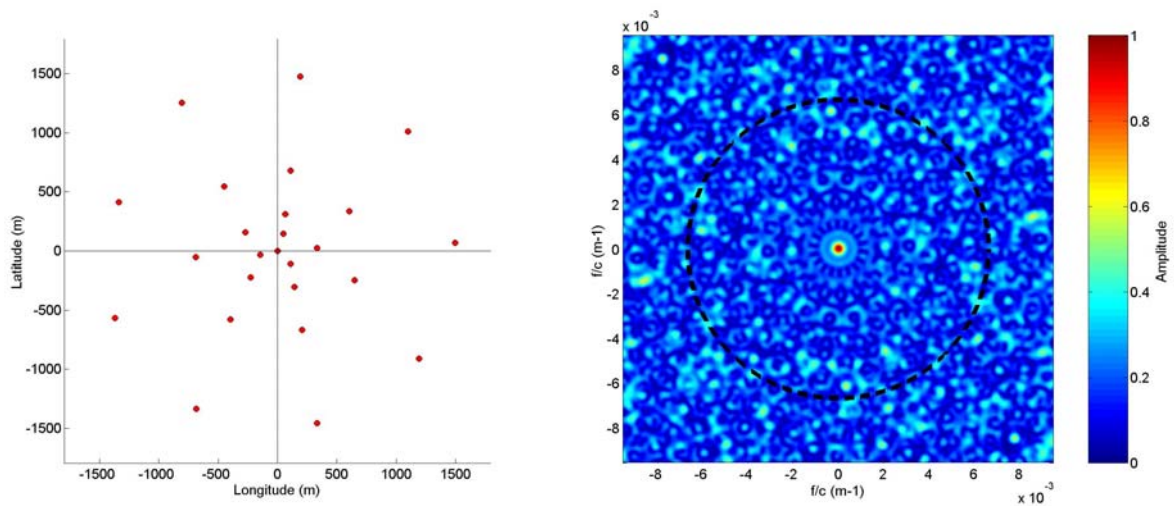
### ***L'antenne NORESS***

Localisation géographique	60.7N, 11.5W, Norvège
Nombre de capteurs	25
Ouverture	3 kilomètres
Distance inter-capteur minimale	152 mètres
$k_{max}$	$0.0033\text{ m}^{-1}$

Les capteurs composant *NORESS* (Fig. 1-8) sont disposés selon des cercles concentriques dont les rayons respectent une relation du type  $R = R_{min} \cdot \alpha^n$  avec  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ . Les valeurs  $R_{min}$  et  $\alpha$  ont été fixées expérimentalement en se basant (1) sur les courbes de décorrélation du bruit de fond enregistré à proximité de l'antenne pour différentes fréquences et (2) sur l'augmentation du rapport signal à bruit que présente le signal somme obtenu après sommation adéquate des différents signaux enregistrés par les capteurs de l'antenne.

Les résultats ont permis de fixer  $R_{min} = 150\text{mètres}$ ,  $\alpha = 2.15$  et  $n = 0, 1, 2, 3, 4$  de manière à introduire des distances inter-capteur variables dans la configuration géométrique de l'antenne et ainsi pouvoir étudier simultanément les ondes couvrant une large bande de fréquence.

*NORESS* a la particularité de présenter un lobe central relativement fin, ainsi qu'une quasi-absence des lobes d'aliasing (Fig. 1-8). Le cercle pointillé représente la position théorique des pics d'aliasing. En théorie, cette antenne permet d'étudier les ondes dont les nombres d'onde sont inférieurs à  $0.003\text{m}^{-1}$ .

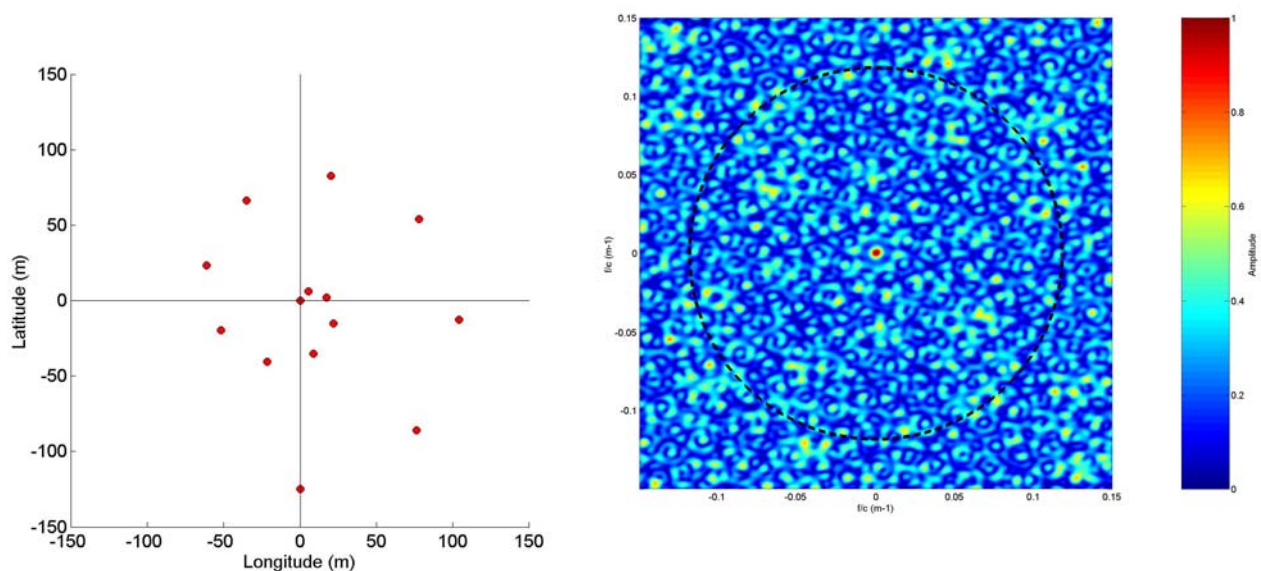


**Fig. 1-8 : Configuration géométrique de *NORESS* (Norvège) (à gauche). Fonction de transfert associée (à droite).**

### ***L'antenne SPIRALE***

Localisation géographique	38.14 N, 21.44E
Nombre de capteurs	14
Ouverture	208 mètres
Distance inter-capteur minimale	8 mètres
$k_{max}$	$0.059 m^{-1}$

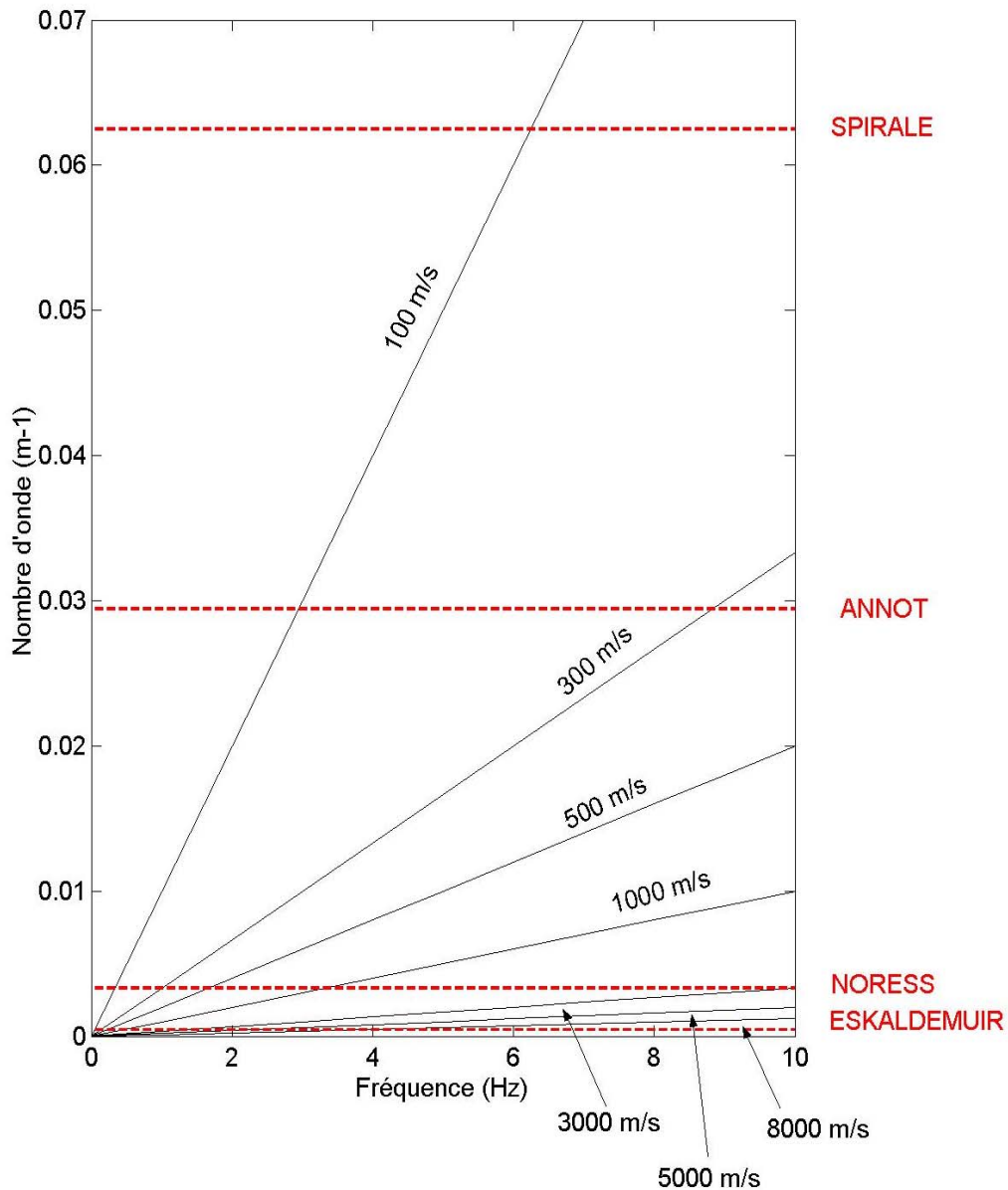
Cette antenne, en forme de spirale (Fig. 1-9), a été déployée dans le golfe de *Corinthe* (Grèce) en février-juin 2002 dans le cadre du projet 3F-Corinth. Sa géométrie a pu être déterminée grâce à des études d'optimisation, tenant simultanément compte de l'ensemble des caractéristiques énoncées ci-dessus (communication personnelle, S. Gaffet). L'originalité de cette antenne réside dans le fait qu'il est impossible de trouver une quelconque symétrie dans sa configuration géométrique. La plupart des antennes déployées ces dernières années présentent une symétrie circulaire. Le respect d'une telle symétrie permet d'assurer une forme plus ou moins isotropique des lobes présents dans la fonction de transfert et donc, ne favorise a priori aucune direction azimutale particulière dans l'antenne. C'était par exemple le cas pour *NORESS*. Pour les antennes en L, la symétrie circulaire n'est pas respectée mais par contre une distance inter-capteur redondante avait été introduite. L'antenne en forme de spirale ne respecte aucune de ces deux dernières caractéristiques. Néanmoins, elle permet d'échantillonner de façon relativement homogène, toutes les distances et toutes les directions azimutales de l'espace. La configuration géométrique de cette antenne ainsi que la fonction de transfert associée sont représentés sur la Fig. 1-9.



**Fig. 1-9 : Configuration géométrique de l'une des antennes déployées dans le golfe de *Corinthe* de février à juin 2002 (à gauche). Fonction de transfert associée (à droite).**

Alors que cette antenne présente une ouverture comparable à celle déployée à *Annot*, elle semble permettre l'exploration d'un domaine en nombre d'onde plus vaste. De plus, l'amplitude moyenne de sa fonction de transfert est plus faible. Cependant, le nombre de capteurs utilisés est égal à quatorze alors que seulement neuf capteurs avaient été utilisés à *Annot*.

La Fig. 1-10 représente un récapitulatif des différentes antennes que nous avons considéré dans ce chapitre et donne leurs domaines de validité en terme d'analyse en nombre d'onde, et donc en terme de contenus fréquentiels et vitesse de propagation.



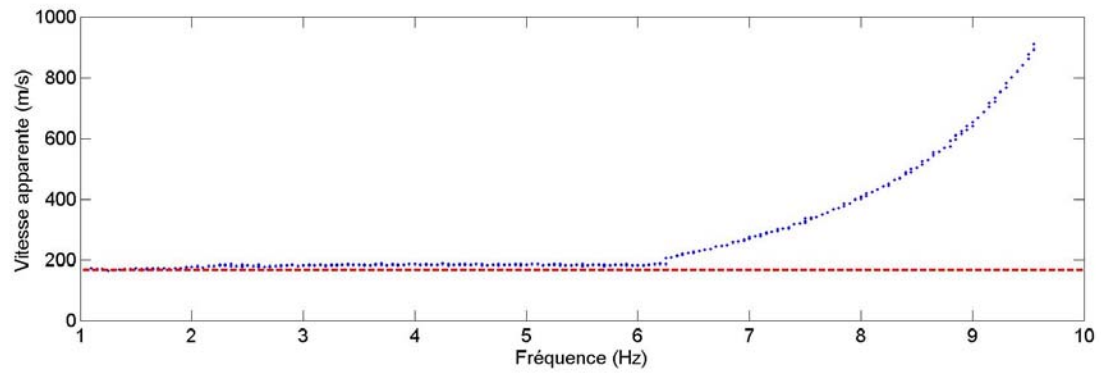
**Fig. 1-10 : Limites de résolution en terme de vitesse et de fréquence des différentes antennes *SPIRALE*, *ANNOT*, *ESKALDEMUIR* et *NORESS*. Les traits pointillés rouges donnent le nombre d'onde maximal associé à chaque antenne.**

Les traits pointillés représentent le vecteur nombre d'onde maximal que l'on sera capable d'analyser avec chacune des antennes. Comme il a déjà été souligné précédemment, ce nombre d'onde maximal dépend de la distance minimale qui sépare deux capteurs adjacents de l'antenne.

Ce graphique permet de montrer que les ondes régionales avec des vitesses de propagation de l'ordre de  $8000 \text{ m/s}$  seront mieux déterminées avec des antennes de type '*NORESS*' ou '*ESKALDEMUIR*' qu'avec celles admettant une configuration géométrique du type '*ANNOT*'. Ces dernières seront par contre plus propices à l'étude des champs d'onde locaux se propageant dans la partie superficielle de la croûte terrestre.

#### 1.1.4. Détermination expérimentale du domaine de validité d'une analyse en antenne

Dans le cas des antennes bidimensionnelles, la distance qui sépare deux capteurs adjacents est variable sur l'ensemble de l'antenne. Concernant l'antenne déployée à *Annot*, la valeur du  $k_{max}$  que nous avons retenu assure un minimum de deux points d'échantillonnage par longueur d'onde pour tous les couples de capteurs situés à l'intérieur de l'antenne. Pour les capteurs situés à l'extérieur de l'antenne, ceci n'est plus vérifié. On peut alors se poser la question de savoir quelle distance inter-capteur minimale il convient de considérer pour déterminer la borne supérieure du domaine des nombres d'onde qu'on peut prétendre analyser avec une antenne bidimensionnelle. Nous avons répondu à cette question de façon expérimentale en faisant propager à travers l'antenne *Annot* une modulation linéaire de fréquence ( $1-10\text{Hz}$ ) avec une vitesse constante et égale  $160\text{m/s}$ . Ce signal est donc caractérisé par une évolution continue des nombres d'onde en fonction du temps, entre  $0.006\text{m}^{-1}$  et  $0.06\text{m}^{-1}$ . Nous avons cherché à savoir quel était le nombre d'onde limite qu'il était possible de déterminer avec l'antenne. Nous avons alors réalisé une transformation de Fourier à deux dimensions pour différentes fenêtres d'analyses prélevées le long du signal. Le nombre d'onde correspondant au lobe le plus énergétique de cette transformée a été retenu comme étant le nombre d'onde optimal caractérisant la propagation. Pour chaque nombre d'onde retenu, connaissant la fréquence du signal, nous avons été en mesure de calculer la vitesse apparente de l'énergie à travers l'antenne. Sur la Fig. 1-11, les points bleus représentent l'évolution de cette vitesse en fonction de la fréquence du signal. Les pointillés rouges représentent la valeur théorique de la vitesse apparente. On constate que la vitesse est correctement estimée lorsque la fréquence est inférieure à  $6.2\text{Hz}$ . Au-dessus de cette valeur, on atteint les limites de résolution de l'antenne. Le nombre d'onde maximal ainsi déterminé expérimentalement est égal à  $6.2/160 = 0.037\text{m}^{-1}$ , ce qui est en accord avec la valeur précédemment obtenue pour  $k_{max}$ , et qui est même légèrement supérieure à  $k_{max}$ .

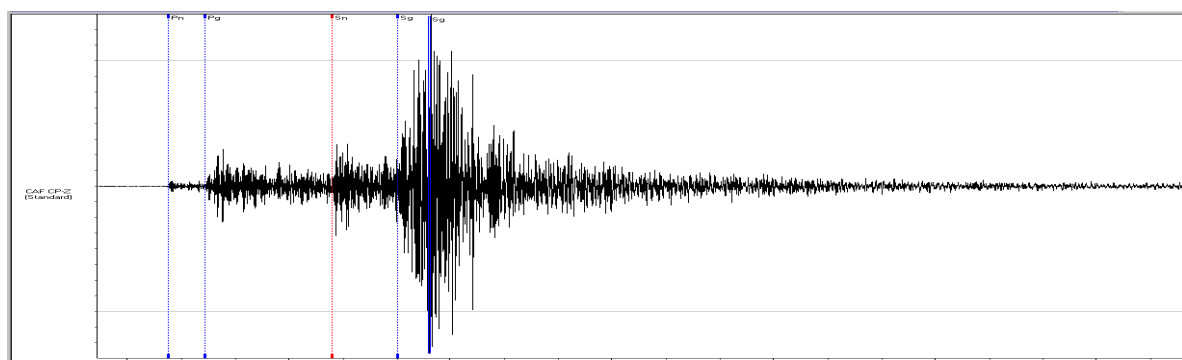


**Fig. 1-11 : Evolution fréquentielle de la vitesse apparente. La courbe rouge représente la valeur théorique de la vitesse de propagation de l'onde à travers l'antenne. Les pointillés bleus représentent les valeurs de la vitesse de propagation trouvées par une analyse en nombres d'onde.**

## 1.2. Les ondes régionales

### **1.2.1. Où en sommes-nous dans la compréhension des ondes régionales ?**

De nombreuses études ont aujourd'hui été réalisées dans le but de comprendre et d'interpréter l'ensemble des phases présentes sur les sismogrammes régionaux. Les phases classiquement enregistrées sont les phases  $P_n$ ,  $P_g$ ,  $S_n$ ,  $S_g$ , et  $L_g$ . Ces phases constituent ce que nous appellerons le champ d'onde primaire. Elles sont diffractées et réfractées par les différentes hétérogénéités qu'elles rencontrent le long de leurs chemins de propagation et forment ainsi les phases secondaires ou la coda du sismogramme. La figure Fig. 1-12 représente l'enregistrement du séisme de Vendée (08/06/2001) enregistré à un peu plus de 300 kilomètres de l'épicentre. On distingue les différentes phases citées précédemment et on observe également que chacune de ces phases sont suivies de nombreuses arrivées, qui véhiculent à elles seules, une part importante de l'énergie du sismogramme. Deux minutes après l'arrivée du train d'onde  $P_n$ , le signal n'a toujours pas atteint son niveau de bruit de fond initial, témoignant du fait que le capteur sismologique continue à enregistrer de l'énergie liée à la perturbation induite par le séisme.



**Fig. 1-12 : Enregistrement du séisme de *Vendée* (08/06/2001) par un des capteur du réseau *LDG* situé à 300 kilomètres de l'épicentre.**

La connaissance qu'ont aujourd'hui les sismologues de la structure interne de la Terre leur permet de construire des modèles de propagation de plus en plus complexes et ainsi de calculer des sismogrammes synthétiques que l'on peut alors directement comparer aux sismogrammes réels. Alors que les trains d'ondes classiques sont souvent bien reproduits, les phases secondaires qui doivent leur existence à l'hétérogénéité du milieu de propagation sont généralement plus difficile à modéliser (Bouchon, 1982). Cette difficulté vient d'une part de la connaissance limitée que nous avons du milieu de propagation et d'autre part, de l'incompréhension que nous avons des interactions entre le champ d'onde et les différentes hétérogénéités du milieu. En effet, si on connaît aujourd'hui de façon relativement précise l'évolution de la vitesse en fonction de la profondeur, les variations latérales de vitesse sont plus difficiles à évaluer et ne peuvent donc pas systématiquement être introduites dans le calcul des sismogrammes synthétiques. A ceci s'ajoute la difficulté de mise en œuvre des techniques numériques capables de prendre en compte les effets de propagation tridimensionnels du champ d'onde (Olsen et al., 1996)

Pour les grandes distances de propagation, l'hypothèse d'un milieu sphérique est généralement vérifiée, du moins pour les couches les plus profondes de la Terre. A distances régionales, et pour les ondes courtes-période, cette hypothèse n'est plus valide puisque le champ d'onde se propage alors essentiellement dans la croûte qui est un milieu contenant de fortes zones hétérogènes, de tailles caractéristiques comparables à la longueur d'onde des phases sismiques régionales. Il en résulte alors des déformations importantes du champ d'onde qui participent à la formation de la coda des sismogrammes. Cependant, s'il est aujourd'hui généralement admis que la coda doit son origine à l'hétérogénéité du milieu de propagation, les différents mécanismes qui la génère ne sont pas encore entièrement compris. Herraiz et Espinosa (1986) donnent une synthèse complète des différentes théories proposées pour expliquer la coda. Nous nous contenterons ici de rappeler les principaux travaux qui ont contribué à avancer dans sa compréhension.

Les premières observations concernant les propriétés des ondes contenues dans la coda furent faites par Aki en 1969. Pour une région donnée, Aki fit remarquer que contrairement au champ d'onde primaire, l'amplitude, le contenu spectral et la durée du champ d'onde liés à la coda des ondes *S* des séismes locaux ( $\leq 100\text{km}$ ) sont insensibles à la distance qui sépare la source du site d'enregistrement. Ces différentes observations lui permirent d'interpréter le champ d'onde coda comme la superposition de phases multiples, statistiquement indépendantes, diffractées par les différentes hétérogénéités qui composent le milieu de propagation. L'auteur insiste alors sur les possibilités qu'offrent les ondes de coda dans la détermination des paramètres liés à la source des tremblements de terre. En particulier, il propose une façon d'estimer le moment sismique des séismes locaux. D'autre part, des paramètres liés au degré d'hétérogénéité moyen caractérisant le milieu de propagation peuvent être déduits des ondes coda. Dans ce premier modèle, Aki suppose que seules des ondes de surface composent la coda et suppose également que la source et le récepteur sont confondus, ce qui veut dire qu'il ne considère que la retro-propagation des ondes de surface. En 1975, sur la base de nouvelles observations, ce modèle



fut amélioré en ne considérant non plus la diffraction simple en ondes de surface, mais également celle en ondes de volume et essentiellement en ondes  $S$  (Aki and Chouet, 1975). Ce modèle est en partie validé par la très bonne adéquation des facteurs de qualité des ondes contenues dans la coda et celles qui composent le champ d'onde  $S$  (Aki, 1980). Sato (1977) a étendu le modèle de diffraction simple au cas où la source et le point d'enregistrement ne sont plus confondus, ce qui lui permet de prendre en compte non seulement les phases rétro-propagées, mais également celles diffractées dans la même direction que la direction de propagation du champ d'onde incident. De plus, il proposa également un modèle de coda qui permet de considérer les conversions  $P$ - $S$  et  $S$ - $P$ .

Un problème conceptuel lié à l'estimation du facteur de qualité est cependant présent dans la théorie de la diffraction simple. Le facteur de qualité constitue une mesure de la décroissance de l'énergie composant le signal, en fonction du temps. Cette décroissance est le résultat de deux processus d'atténuation différents qui sont d'une part l'atténuation intrinsèque et d'autre part, l'atténuation due à la diffraction du champ d'onde par les différentes hétérogénéités qui composent le milieu de propagation. Dans la théorie de la diffraction simple, c'est une atténuation apparente qui est évaluée et la séparation en atténuation intrinsèque et atténuation par diffraction ne peut donc pas être faite. Avec les modèles de diffractions multiples, cette séparation va devenir possible. Les modèles de diffractions multiples doivent être introduits dès lors que la distance qui sépare les différents diffracteurs est inférieure à celle qui sépare la source du point d'enregistrement. Cette condition étant souvent vérifiée, il devient plus réaliste de prendre en compte les diffractions multiples du champ d'onde. Un tel modèle fut d'abord proposé par Kopnichev (1977) qui prit en compte les doubles et triples diffractions du champ d'onde. Gao et al. (1983) étendirent ce modèle et prirent en compte les diffractions multiples du champ d'onde jusqu'à l'ordre sept. Ils montrèrent que pour des temps courts de propagation, le modèle de diffraction multiple est équivalent à celui de la diffraction simple. Pour des temps de propagation plus long, le mécanisme dominant est la diffraction multiple. Ces derniers auteurs montrèrent alors qu'en supposant l'absorption intrinsèque négligeable, le facteur de qualité issu d'un modèle de diffraction simple est surestimé d'un facteur 1.4 par rapport à celui issu d'un modèle de diffraction multiple. Cependant, l'une des hypothèses de leur modèle est que la source et le point d'enregistrement des ondes admettent la même localisation. Un tel modèle de diffraction multiple avait déjà été proposé par Aki et Chouet (1975).

Un nouvel élan fut donné à l'étude des phénomènes de diffractions multiples par Wu (1985) qui introduit pour la première fois en sismologie la théorie du transfert radiatif. Les signaux ne sont plus décrits par l'équation d'onde mais directement par l'énergie qu'ils véhiculent. L'auteur introduit également la notion d'albedo sismique du milieu de propagation qui permet de mesurer le rapport entre l'atténuation de l'énergie du signal due à la diffraction et celle due à l'absorption anélastique. La quantification de l'importance relative de chacun des deux mécanismes devient donc possible. Une forte valeur d'albedo signifiera par exemple que le mécanisme d'atténuation dominant est celui de la diffraction. Wu et Aki (1988) appliquent cette théorie à la région d'Hindu Kush et montrent qu'entre

2 et 20 Hz, la diffraction n'est pas le principal phénomène responsable de l'atténuation des ondes  $S$ . Depuis, ce modèle a été appliqué à divers jeux de données et la part d'atténuation intrinsèque et d'atténuation par diffraction a pu être quantifiée dans différentes régions du globe. Toksöz et al. (1988) mesurèrent l'albedo sismique au Canada et dans le nord-est des Etats-Unis et trouvèrent que la diffraction est le mécanisme dominant. Cependant, comme il a déjà été rapporté précédemment, le modèle du demi-espace homogène proposé par Wu (1985) n'est pas réaliste. Des modèles plus complexes ont alors été introduits, permettant de prendre en compte des milieux de propagation plus proches de la réalité qu'un demi-espace. Margerin et al. (1998) propose un nouveau modèle composé d'une croûte hétérogène et d'un manteau homogène. A partir de ce modèle, la coda est expliquée par la diffusion multiple des ondes dans la croûte et la décroissance d'énergie de la coda est expliquée par la fuite des ondes dans le manteau et par une faible atténuation intrinsèque.

Weaver (1990) et Ryzhik et al. (1996) ont montré que dans l'approximation de diffusion, l'évolution temporelle du rapport de la densité d'énergie d'onde  $P$  et la densité d'énergie d'onde  $S$  devient constant : c'est le phénomène d'équipartition de l'énergie. Une première observation de ce phénomène a été faite sur des séismes locaux enregistrés au *Mexique* (l'équipartition est atteinte environ 25 sec. après l'arrivée du train d'onde  $S$ ) (Shapiro et al., 2000). Cette observation prouve que, pour des temps suffisamment longs, la coda peut être expliquée par un processus de diffusion multiple.

Si l'ensemble des modèles exposés précédemment permettent d'expliquer d'un point de vue macroscopique l'énergie qui constitue la coda des sismogrammes régionaux, ils ne permettent pas d'expliquer la coda enregistrée directement après l'arrivée des ondes  $P$  ou  $S$  et qui semble résulter d'une combinaison de différents mécanismes.

Dans ce travail, l'un des objectifs fondamentaux est de montrer qu'au moins une partie de l'énergie de la coda peut être expliquée en invoquant un processus déterministe. Nous chercherons donc à caractériser le maximum de l'énergie qui peut être expliquée par une propagation en ondes planes à travers l'antenne. Ces phases déterministes de la coda contiennent toute l'information relative aux hétérogénéités ponctuelles du milieu de propagation et sont donc intéressantes à étudier. Dans le prochain paragraphe, nous présentons le modèle que nous avons adopté pour décrire les phases déterministes présentes dans la coda des sismogrammes régionaux.

### 1.3. Modèle déterministe

Nous considérerons que les phases présentes sur les sismogrammes résultent d'une part des phases primaires, qui ont eu un chemin de propagation directe entre la source et les différents récepteurs et d'autre part, de l'ensemble des phases diffractées par les différentes hétérogénéités qui composent le milieu de propagation. Le champ d'onde enregistré par une antenne sismologique est alors décrit par une superposition d'ondes planes :

$$s(t, \vec{r}) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q A_{ij} \exp\left(i\left(\vec{k}_{ij} \cdot \vec{r} - 2\pi\nu_i t + \phi_{ij}(t)\right)\right) + \eta(t, \vec{r})$$

Eq. 1-3

où  $\vec{r}(x, y)$  est le vecteur position de chacun des capteurs ayant enregistré le champ d'onde et  $t$  est la variable de description temporelle. Autour de chaque temps  $t$  et pour chacune des fréquences  $\nu_i$  ( $1 \leq i \leq p$ ) contenues dans le signal,  $q$  ondelettes peuvent être présentes, chacune étant caractérisée par son vecteur nombre d'onde  $\vec{k}_{ij}(k_{ij \text{ / est}}, k_{ij \text{ / nord}})$  et son amplitude  $A_{ij}$ .  $\eta(t, \vec{r})$  est le bruit contenu dans les sismogrammes.

Le modèle de coda que nous nous sommes donné décrit uniquement la partie déterministe du champ d'onde, qu'il est possible d'expliquer par une propagation cohérente à travers l'antenne. A l'opposé, nous qualifierons de bruit, toute l'énergie qu'il n'est pas possible de décrire par ce modèle de décomposition. Nous supposons dans la suite de nos développements que ce bruit ne présente aucune corrélation avec le signal et qu'il est distribué de façon aléatoire dans l'espace.

Les différentes ondelettes que nous cherchons à extraire de l'ensemble des signaux sismiques seront entièrement décrites lorsque nous leur aurons attribué une amplitude, un temps d'arrivée ainsi qu'une durée, un contenu fréquentiel et un vecteur nombre d'onde. Nous expliciterons dans le chapitre II, les différentes techniques qui permettent de déterminer l'ensemble de ces paramètres.

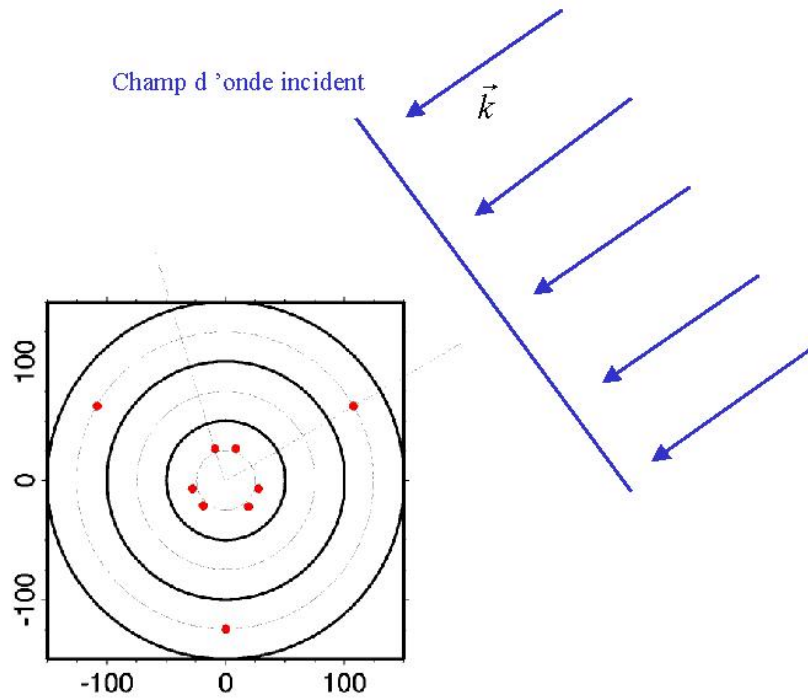
Le concept d'antenne sismologique ainsi que ses diverses applications ont déjà été présentés dans le paragraphe 1.1. Dans le prochain paragraphe, nous montrerons néanmoins pourquoi une antenne est particulièrement bien adaptée pour déterminer les paramètres que nous cherchons à extraire des signaux.

## 1.4. De l'utilité des antennes pour « décortiquer » la coda

### 1.4.1. Les paramètres de propagation

Nous avons déjà expliqué qu'une sommation adéquate des champs d'onde qui se propagent à travers une antenne permet non seulement la détection d'événements de très faible magnitude mais en même temps, permet l'estimation des paramètres de propagation relatives à ces champs d'onde. Ces paramètres sont entièrement définis lorsqu'on a estimé (1) la direction et (2) la vitesse apparente de propagation des différents champs d'onde.

Supposons qu'une onde plane  $s(t, \vec{r})$  se propage à travers une antenne sismologique comme il est schématisé sur la Fig. 1-13.



**Fig. 1-13 : Champ d'onde incident à travers une antenne sismologique. La propagation du champ d'onde est entièrement décrite par le vecteur nombre d'onde  $\vec{k}$ .**

Cette onde est caractérisée par une fréquence d'oscillation  $\nu_0$  et un vecteur nombre d'onde  $\vec{k}_0$  et s'écrit :

$$s(t, \vec{r}) = \exp[i(\vec{k}_0 \cdot \vec{r} - 2\pi\nu_0 t)]$$

On a par ailleurs supposé que son amplitude est égale à 1.

Les paramètres de ce champ d'onde seront donc entièrement définis lorsqu'on aura retrouvé la fréquence  $\nu_0$  et le vecteur nombre d'onde  $\vec{k}_0$  qui gouverne sa propagation. On sera alors en mesure d'estimer la direction  $\theta_0$  ainsi que la vitesse apparente de propagation  $c_0$ , puisque

$$\theta_0 = \text{Arc tan} \left( \frac{k_{EST}}{k_{NORD}} \right) \text{ et } c_0 = \frac{2\pi\nu_0}{|\vec{k}_0|}$$

où  $k_{EST}$  et  $k_{NORD}$  sont les projections du vecteur nombre d'onde sur les axes géographiques orientés selon les directions E-O et N-S. L'angle  $\theta_0$  est donc aussi l'angle entre le nord géographique et la direction donnée par le vecteur nombre d'onde  $\vec{k}_0$  caractérisant la propagation de l'onde. Le prochain chapitre est entièrement dédié aux différentes façons de procéder pour retrouver ces paramètres.

La vitesse apparente de propagation ne correspond pas à la vitesse réelle de l'onde dans le milieu puisqu'elle est obtenue à partir d'une projection du vecteur nombre d'onde sur le plan horizontal. Une étude supplémentaire visant à prendre en compte les trois composantes du mouvement doit être faite pour retrouver l'angle d'incidence de l'onde sous l'antenne et en déduire sa vitesse réelle de propagation dans le milieu. La relation qui lie la vitesse apparente de propagation, la vitesse réelle  $V_0$  et l'angle d'incidence  $i_0$  de l'onde est donnée par :

$$c_0 = \frac{V_0}{\sin(i_0)}$$

#### Éq. 1-4

Notons d'ailleurs qu'exactement les mêmes informations (azimut et vitesse) pourraient être obtenues à partir d'un capteur qui enregistre simultanément les trois composantes du mouvement. Cependant, des études ont comparé les paramètres de propagation obtenus à partir d'une antenne avec ceux obtenus à partir d'un seul capteur trois composantes. Les résultats ont montré que les techniques d'antennes étaient plus robustes à l'évaluation de ces paramètres, surtout lorsque le rapport signal sur bruit devenait faible (Harris, 1990, Suteau-Henson, 1990). La raison principale est que les signaux et par conséquent, les paramètres de propagation obtenus à partir d'un seul capteur, sont fortement dépendant des effets de sites très locaux au site d'enregistrement. Estimés à partir d'une antenne, ces effets locaux sont moyennés et ont donc tendance à s'atténuer. Plus récemment, Wagner (1996) proposa une méthode capable de mixer les informations apportées simultanément par une antenne et un capteur trois composantes. Aujourd'hui, à notre connaissance, aucune analyse en antenne n'a utilisé de façon systématique et intensive les trois composantes du mouvement du sol de manière à évaluer leur réel apport dans la détermination des paramètres de propagation. Les développements méthodologiques actuels visent cependant à intégrer simultanément ces deux types d'informations et semble être un des futurs axes de recherche dans le domaine des analyses en antenne. En effet, la prise en compte des mouvements du sol dans les trois directions de l'espace nous donne une description supplémentaire du

champ d'onde et donc également un moyen supplémentaire de séparer les ondes dont les polarisations sont différentes. Le Bihan (2001) a proposé une nouvelle approche fondée sur l'utilisation des quaternions (extension des nombres complexes dans l'espace tridimensionnel) pour la séparation d'onde. Un quaternion permet de rendre compte simultanément des propriétés de polarisation associées à chaque échantillon temporel. Cette approche est prometteuse pour la séparation de composantes multiples présentant des polarisations différentes. De plus, la connaissance des caractéristiques de la polarisation de chacune des phases associée à celles de la propagation permettrait d'évaluer les vitesses réelles des ondes dans le milieu de propagation (Éq. 1-4).

L'attribution des paramètres de propagation à chacune des phases déterministes, par une antenne, couplée avec celle des temps d'arrivées permettra d'émettre des hypothèses quant à la localisation géographique des hétérogénéités responsables de leurs existence. Même si on peut imaginer que les différentes phases secondaires présentes sur les sismogrammes sont le résultat de diffractions multiples, l'utilisation d'une antenne permet uniquement de retrouver la direction azimutale du dernier diffracteur rencontré par le champ d'onde. C'est une limitation inhérente au concept des antennes sismologiques : on doit faire l'hypothèse qu'une diffraction prédominante a affecté le champ d'onde et considérer que toutes les autres ont été négligeables. Dans les chapitres III et IV, nous montrerons comment nous nous sommes servis des paramètres de propagation attribués à chacune des phases de la coda pour reconstruire les zones hétérogènes du milieu de propagation, responsables des déformations du champ d'onde.

#### **1.4.2. Les applications des antennes à l'étude de la coda**

De nombreuses études ont déjà montré que le concept d'antenne était bien adapté pour caractériser le type de phases qui composent la coda des sismogrammes. Wagner et Owens (1993) étudièrent la coda des séismes locaux enregistrés par le réseau de l'observatoire du Piñon Flat (sud de la Californie) et montrèrent qu'alors que la coda des ondes  $P$  semble être essentiellement dominée par des ondes de même type se propageant selon l'azimut de la source, la coda des ondes  $S$  est plus complexe puisque de l'énergie se propage à travers le réseau selon toutes les directions de l'espace. Ils invoquent alors la théorie de Aki et Chouet (1975) qui proposent que la coda des ondes  $S$  soit le résultat de la diffraction du champ d'onde primaire sur des hétérogénéités distribuées aléatoirement dans le milieu de propagation. Ils relient la différence de comportement entre la coda de l'onde  $P$  et  $S$  aux différences de contenu spectral que présentent ces deux types d'ondes, qui seraient donc influencées par des hétérogénéités de types et de tailles différentes. Des résultats similaires avaient déjà été observés sur des tirs de carrières situés à distances régionales des antennes *NORESS*, *FINESS* et *ARCESS* (Dainty et Toksöz, 1990). La coda de la phase  $Lg$  contient des phases qui se propagent selon toutes les directions de l'espace, avec cependant une vitesse moyenne typiques de celle des ondes  $Lg$ . La coda des ondes  $P$  contient, quant à elle, des phases dont les directions de propagation

sont similaires à la direction théorique de propagation. Cependant, l'analyse menée sur les trois antennes précédemment citées permet de mettre en évidence une vitesse de propagation systématiquement différente. Les auteurs interprètent ces variations de vitesses comme la présence simultanée de phases diffractées  $P$ - $P$ ,  $P$ - $S$  et  $S$ - $P$ . Une étude du même type a été menée uniquement sur la coda  $P$  des sismogrammes régionaux enregistrés par chacune des trois antennes précédentes ainsi que sur l'antenne *NYNEX* (New England) (Dainty et Schultz, 1995). Cette étude montre que, globalement, les ondes qui composent la coda  $P$  peuvent être subdivisées en trois groupes : celles qui ont une vitesse supérieure ou semblable à la vitesse des phases  $P_n$ , celles qui ont une vitesse proche des vitesses typiques de  $P_g$ , et celles qui ont une vitesse beaucoup plus faible, caractéristique des ondes  $L_g$ . Par contre, les trois groupes montrent des azimuts stables autour de l'azimut théorique ( $\pm 20^\circ$ ). Alors que les phases se propageant avec une vitesse apparente comprise entre celles typiques des phases  $P_g$  et  $P_n$  peuvent s'expliquer par un processus de réflexions multiples du type  $P$ - $P$  entre le Moho et la surface libre, les phases se propageant avec des vitesses du type  $L_g$  restent inexpliquées si on considère un modèle de croûte classique à interfaces planes et régulières. Les auteurs proposent alors, pour expliquer les phases présentes dans la coda, la diffraction du champ d'onde  $P$  incident sur des discontinuités de topographie irrégulière. Les effets liés à deux types de discontinuités sont examinés : d'une part l'influence du Moho et d'autre part celle d'une couche à faible vitesse présente à la surface de la Terre. Le calcul des coefficients de réflexion d'un champ d'onde  $P$  incident en ondes  $P$  ou  $S$ , sur chacune des deux types de surface irrégulière, montre que les deux mécanismes sont efficaces pour générer des phases secondaires de types  $P$  ou  $L_g$ . L'amplitude de ce champ d'onde secondaire augmente lorsque l'irrégularité de la discontinuité devient plus forte. D'autre part, le mécanisme consistant à imaginer la présence d'une couche de topographie irrégulière à faible vitesse à la surface de la Terre semble être plus propice à générer des phases secondaires que la présence d'un Moho irrégulier. Une autre étude (Kvaerna et Doornbos, 1991) avait déjà permis d'imaginer une topographie irrégulière comme responsable d'une phase secondaire se propageant  $0.6s$ . après la phase classique  $P_n$  sur *NORESS*. Cette phase secondaire, d'énergie très supérieure à la phase  $P_n$ , peut donc être confondue avec cette dernière et engendrer un biais dans la localisation de l'épicentre. La différence de temps de propagation de  $0.6s$ . est compatible avec celle d'une phase diffractée sur le Moho et après localisation de la zone de diffraction, les auteurs ont pu montrer que cette zone coïncide avec un des bords du graben d'Oslo.

Gupta et al. (1990) étudièrent la coda de signaux sismiques régionaux, enregistrés par *NORESS*. Ils identifièrent une source secondaire, le lac *Mjosa*, localisée à une trentaine de kilomètres au S-O de l'antenne. Cette source secondaire génère des ondes de surface, attribuées à la diffraction des ondes  $P$  incidentes dans la zone du lac. D'autres auteurs (Wagner et Langston, 1992 ; Bannister et al., 1990) menèrent une étude similaire sur la coda des signaux téléseismiques également enregistrés par *NORESS*

et purent ainsi mettre en évidence, 15 secondes après la première arrivée, la présence systématique d'ondes de surface qu'ils attribuèrent à la même l'origine.

L'expérience de Caille (S-E de la France, 1994) constitue une des premières expériences spécialement dédiée à l'étude des phases secondaires présentes dans la coda des séismes locaux (Gaffet et al., 1998). Une antenne d'ouverture égale à 300 mètres a été déployée dans la vallée de Caille-Andon et la sismicité naturelle a été enregistrée pendant trois mois consécutifs. Les principaux résultats de cette étude sont que (1) dans la coda des sismogrammes, après un temps de propagation égal au double du temps de propagation des ondes *S*, des phases secondaires qui restent cohérentes se propagent à travers l'antenne sismologique et (2) la majeure partie de l'énergie présente dans les sismogrammes se propagent de façon prépondérante selon une gamme d'azimut qui peut ne pas être corrélée à l'azimut théorique de la source (Tressols, 1998). Cette gamme d'azimut varie avec la localisation géographique des événements considérés.

L'ensemble de toutes ces études ont permis de montrer que les antennes sismologiques sont des outils particulièrement bien adaptés dès lors que l'on s'intéresse à caractériser les phases secondaires qui accompagnent la propagation d'un champ d'onde incident. Les travaux réalisés durant cette thèse se placent exactement dans ce cadre-là puisqu'ils ont consistés à identifier, caractériser et interpréter les phases déterministes présentes sur les signaux enregistrés à distance régionale par une antenne sismologique. Les signaux enregistrés durant l'expérience d'Annot (Alpes de Hautes-Provence) constitueront le principal jeu de données analysés durant cette thèse. Cette expérience et les résultats qui en découlent font l'objet du chapitre IV de ce manuscrit.

### **1.4.3. Complexité de la coda : quelques illustrations**

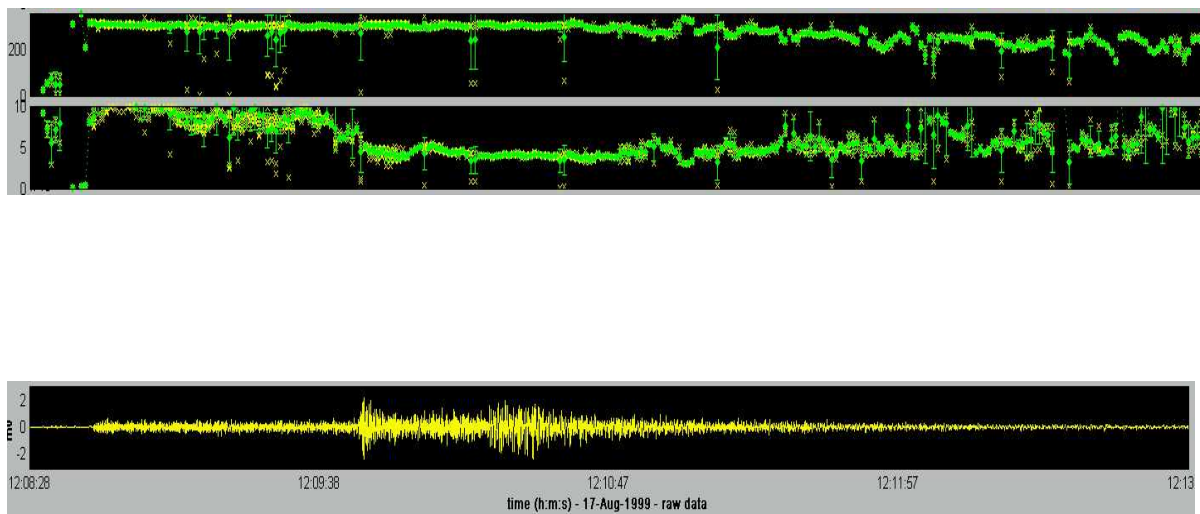
A travers les différents exemples qui suivent, nous voudrions d'une part attirer l'attention sur la variabilité des coda que l'on peut rencontrer dans la nature ainsi que le lien qui existe entre la complexité de cette coda et la distance à laquelle on enregistre les événements.

Trois séismes sont présentés, enregistrés par les antennes '*SPITZBERG*', '*GERESS*' et '*GIAT*'. L'ouverture respective de chacune de ces antennes est 1, 4 et 3 kilomètres.

En utilisant la méthode de décomposition temps-fréquence-nombre d'onde *PMCC* (Progressive Multiple Channel Correlation, Cansi, 1995), nous avons déterminé l'évolution temporelle des directions et des vitesses apparentes de propagation des coda présentes sur les trois enregistrements. Les résultats des analyses sont présentés sur les Fig. 1-14, Fig. 1-15 et Fig. 1-16. Nous avons systématiquement représenté (a) l'évolution temporelle des directions de propagation, (b) l'évolution temporelle des vitesses apparentes de propagation et (c) le signal enregistré par un des capteurs de l'antenne.



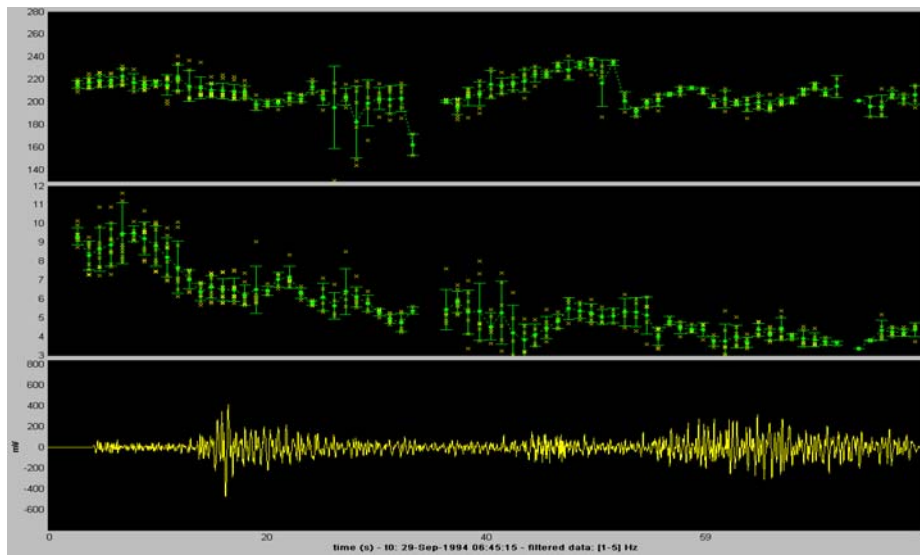
L'événement enregistré par l'antenne *SPITZBERG* est localisé à 600 kilomètres. La tranche de temps représentée est environ égale à 240sec.. Les paramètres de propagation sont caractérisés par une stabilité temporelle remarquable. Dans la première moitié du signal présenté, les directions de propagation sont similaires à la direction théorique de la source. Dans la deuxième moitié, les directions de propagation présentent une diminution continue vers un azimuth N200°.



**Fig. 1-14 :** Résultat de l'analyse de l'événement enregistré par l'antenne *SPITZBERG*. Evolution temporelle des directions de propagation (*en haut*). Evolution temporelle des vitesses de propagation (*au milieu*). Le signal enregistré par un des capteurs de l'antenne *SPITZBERG* (*en bas*).

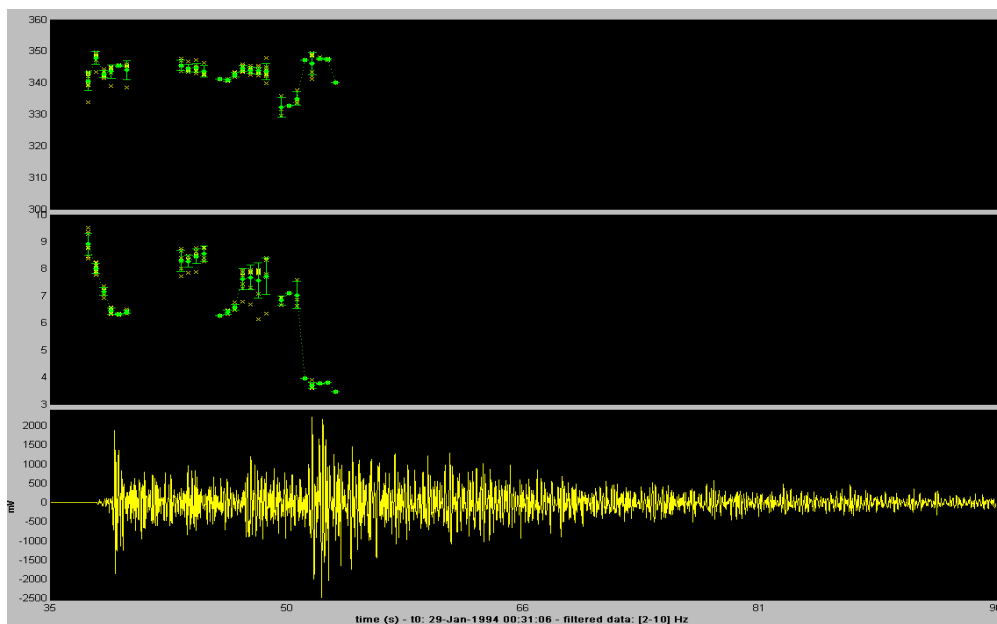
D'autres coda du même type ont pu être analysées durant mon séjour d'un mois au *NORSAR* (Norvège) et nombre d'entre elles présentent des caractéristiques similaires, dont les origines n'ont pas encore été clairement expliquées. La propagation d'ondes dans différents modèles de croûte a cependant été simulée et a montré que la présence d'un litage à la base du Moho (alternances croûte-manteau) pourrait être un mécanisme efficace dans la génération de la coda, qui permettrait d'expliquer une partie de nos observations.

L'événement enregistré par l'antenne *GERESS* est localisé à 300 kilomètres. Les paramètres de propagation présentent une stabilité moins importante pour cet événement que pour celui enregistré par l'antenne *SPITZBERG*, mais la cohérence des champs d'onde qui composent la coda est suffisamment élevée pour que des paramètres de propagation puissent être retrouvés pour quasiment l'ensemble du signal.



**Fig. 1-15 : Résultat de l'analyse de l'événement enregistré par l'antenne *GERESS*. Evolution temporelle des directions de propagation (*en haut*). Evolution temporelle des vitesses de propagation (*au milieu*). Le signal enregistré par un des capteurs de l'antenne *GERESS* (*en bas*).**

Le dernier événement a été enregistré par l'antenne *GIAT*. La distance qui sépare l'antenne de l'épicentre du séisme est maintenant égale à 110 kilomètres. Pour cet événement, une quantité très faible d'énergie peut être expliquée par la propagation d'une phase cohérente à travers l'antenne. Seules quelques phases isolées du sismogramme ont pu être caractérisées en terme de paramètres de propagation. Une grande partie de l'énergie contenue dans les sismogrammes restent inexpliquée.



**Fig. 1-16 : Résultat de l'analyse de l'événement enregistré par l'antenne *GIAT*. Evolution temporelle des directions de propagation (*en haut*). Evolution temporelle des vitesses de propagation (*au milieu*). Le signal enregistré par un des capteurs de l'antenne *GIAT* (*en bas*).**

Ces quelques illustrations montrent que dans les régions du globe terrestre où la croûte forme un milieu de propagation relativement homogène et où le champ d'onde échantillonne essentiellement la partie inférieure de la croûte, la coda est caractérisée par une grande stabilité des paramètres de propagation ; c'est l'exemple de la coda qui avait été enregistrée par l'antenne *SPITZBERG*.

Par contre, lorsque l'hétérogénéité du milieu de propagation devient plus forte, et pour des distances de propagation plus faibles, la coda peut présenter des caractéristiques moins stables. A partir d'une méthode classique d'analyse, seules les phases principales ont pu être caractérisées en terme de paramètres de propagation, les phases secondaires présentant trop peu de cohérence à l'échelle de l'antenne pour pouvoir être décrites convenablement ; c'est l'exemple de la coda qui a été enregistrée sur l'antenne *GIAT*.

Nous montrerons que les signaux enregistrés à *Annot* sont plus proches, en terme de stabilité temps-azimut-vitesse de l'événement enregistré à *GIAT* que de celui enregistré au *SPITZBERG*. La faible distance qui sépare les antennes déployées à *Annot* et l'ensemble des événements analysés durant cette campagne implique que le champ d'onde s'est essentiellement propagé dans la partie superficielle de la croûte terrestre, caractérisée par la présence de fortes hétérogénéités latérales. Les signaux, résultants de la propagation du champ d'onde direct dans le milieu, sont complexes, ce qui nécessite le développement d'outils d'analyse haute résolution, capables de décrire l'évolution temporelle des paramètres de propagation associés à chacune des phases de la coda.

## ***CHAPITRE II***

### ***METHODOLOGIE***



## 2. Méthodologie

Dans ce chapitre nous allons présenter l'ensemble de la méthodologie déployée pour détecter et caractériser l'ensemble des composantes ondulatoires présentes dans la coda des sismogrammes enregistrés à distance régionale d'une nappe de capteurs. Nous cherchons à attribuer à chacune des phases présentes sur les sismogrammes, un temps d'arrivée et une durée, un contenu spectral ainsi qu'une direction et une vitesse apparente de propagation. L'estimation de ces différents paramètres nous permettra, lors de l'étude de sismogrammes réels, de relier la présence des différentes phases secondaires aux hétérogénéités qui en sont responsables. Dans le chapitre I, nous avons déjà apporté des éléments de réponse quant à la détermination des différents paramètres énoncés ci-dessus. Ce chapitre est scindé en trois parties distinctes.

La première partie concerne la détection des différentes phases sismiques que nous cherchons à caractériser. Nous rappelons que nous ne nous intéresserons qu'aux phases déterministes contenues dans les sismogrammes. Ces phases seront détectées si elles présentent d'une part, une énergie suffisamment élevée par rapport à l'énergie globale contenue dans les signaux et d'autre part, si elles sont suffisamment cohérentes à l'échelle de l'antenne sismologique. Nous utiliserons une méthode de décomposition particulière pour réaliser ces détectations, que nous couplerons avec à un calcul de cohérence locale des signaux.

Pour chacune des zones temps-fréquence les plus énergétiques et les plus cohérentes, une décomposition en nombre d'onde sera réalisée. Cette décomposition fait l'objet de la deuxième partie de ce chapitre. Elle permet de retrouver les directions et les vitesses apparentes de propagation de chacune de ces phases. Les méthodes classiquement utilisées seront rappelées. Nous nous concentrerons néanmoins sur celles qui visent à décomposer l'espace des données en un sous-espace '*signal*' et un sous-espace qui lui est orthogonal, le sous-espace '*bruit*'.

Enfin, une méthode de décomposition temps-fréquence-nombre d'onde permettant de retrouver l'évolution temporelle et fréquentielle des phases qui composent les signaux sera présentée. La troisième et dernière partie de ce chapitre est consacrée au déroulement complet d'une telle analyse. Les principaux apports méthodologiques qui ont été développés pendant cette thèse y sont présentés. L'étude de différents cas synthétiques sera également menée et permettra de mettre en évidence le caractère haute-résolution de la méthode développée.

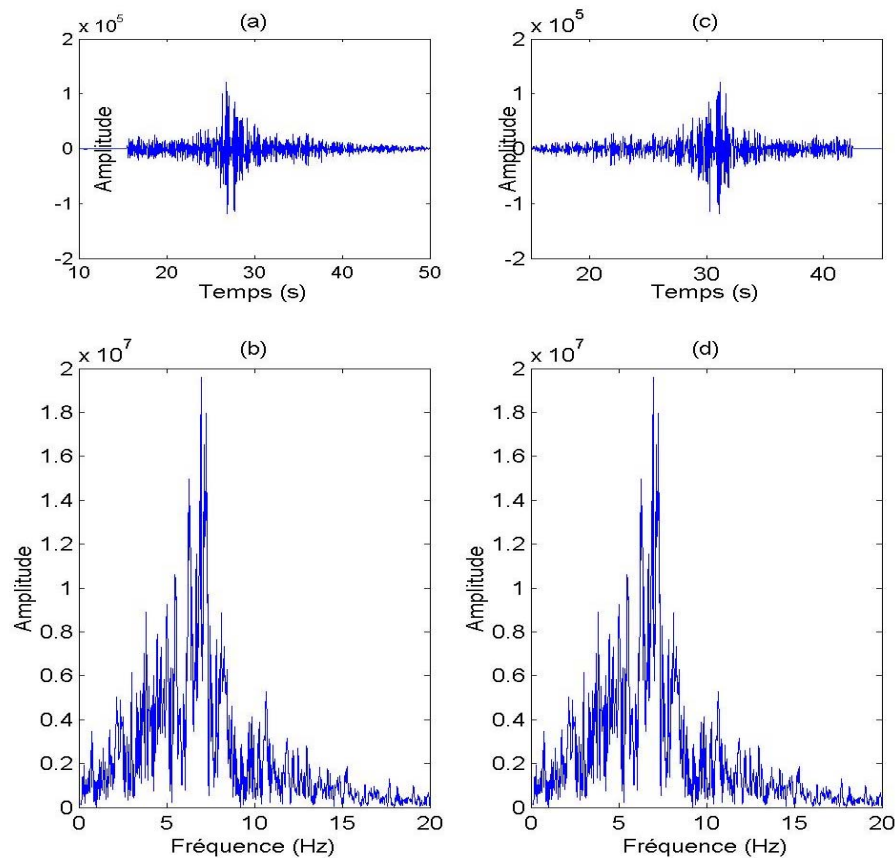
## 2.1. De la séparation d'ondes dans le domaine fréquentiel ...

Un capteur sismologique enregistre l'amplitude du mouvement du sol au passage des ondes élastiques libérées lors d'un tremblement de terre. Le sismogramme est l'évolution de l'amplitude de ce mouvement en fonction du temps. Son analyse permet de connaître les temps d'arrivées des phases classiquement étudiées et d'en déduire des propriétés quant à la structure du milieu traversé par les ondes. Une autre représentation souvent utilisée en sismologie est la décomposition du sismogramme dans l'espace de Fourier. Cette deuxième représentation est complémentaire de celle en temps et est également porteuse d'un grand nombre d'informations concernant l'événement sismique. Par exemple, le seul contenu fréquentiel du sismogramme permet d'émettre des hypothèses quant à la distance qui sépare l'épicentre du tremblement de terre et le site d'enregistrement. Dans le but d'atteindre les objectifs que nous nous sommes fixés, nous avons besoin de connaître la fréquence dominante de chacune des phases sismiques que nous cherchons à caractériser. Une transformée de Fourier classique est incapable de nous donner cette information, puisqu'elle se restreint à donner une information globale, relative à l'ensemble du signal et perd donc toute notion de chronologie. D'autres techniques capables de décrire simultanément le signal en temps et en fréquence doivent donc être utilisées. Ces techniques sont décrites rapidement dans la première partie de ce chapitre. Une synthèse plus complète est présentée dans la thèse de Tressols (1996).

### **2.1.1. La transformée de Fourier et ses limitations**

La transformée de Fourier décompose le signal sur un ensemble de signaux de '*base*' qui sont les cosinus et les sinus et recherche le poids de chacune de ces fonctions pures dans le signal. Cet outil est parfaitement adapté à la description des signaux stationnaires. De plus, de par ses bonnes propriétés, la transformation du signal dans l'espace des fréquences facilite très largement les opérations de filtrage souvent utilisées en sismologie. Cependant, lorsque le temps devient un élément nécessaire et indispensable à la bonne description de la série temporelle, c'est à dire lorsque ses propriétés (amplitude, fréquence instantanée, bande passante, fréquence centrale ...) ne sont plus statistiquement invariantes au cours du temps, la transformée de Fourier classique ne donne plus une représentation suffisante du signal puisqu'elle cache toute l'information relative à l'évolution temporelle. Cette information n'est pas perdue et peut entièrement être retrouvée par une transformation inverse, mais elle est simplement comprise dans les phases des sinus et des cosinus sur lesquels on a décomposé le signal. Ceci est illustré sur la (**Fig. 2-1**) où la transformée de Fourier d'un signal quelconque ainsi que celle de ce même signal retourné dans le temps, ont été calculées. Alors que les temps d'arrivées des différentes phases ont complètement été inversés, une répartition

énergétique identique est observée dans les deux cas. Cet exemple montre que l'outil 'transformée de Fourier' est inadapté à l'étude de tels signaux.



**Fig. 2-1 : (a-b) un signal réel et son spectre de Fourier. (c-d) le même signal réel retourné dans le temps et son spectre de Fourier.**

Dans ce travail, nous cherchons justement à identifier, séparer et caractériser différentes phases qui se propagent simultanément à travers une antenne d'observation. Une transformée de Fourier classique ne permettra pas une telle séparation et n'est donc pas directement utilisable. Une des solutions, qui paraît aujourd'hui assez intuitive, est d'introduire des transformations du signal qui permettent de décrire aussi bien son évolution temporelle que son évolution fréquentielle : on appellera de telles transformations des '*décompositions temps-fréquence*' du signal.

### 2.1.2. Les décompositions temps-fréquence

#### *Définition des grandeurs instantanées*

Des concepts de fréquence et d'amplitude instantanée, capables de décrire un caractère local du signal vont être introduits.

Soit  $s(t)$ , un signal monochromatique, d'amplitude constante et égale à  $A$ .



$$s(t) = A \cos(2\pi(v_0 t)) = A \cos(2\pi\Phi(t))$$

Éq. 2-1

La fréquence de cette oscillation est la dérivée temporelle de la phase du signal :

$$v_0 = \frac{d\Phi(t)}{dt} = \frac{d(v_0 t)}{dt}$$

Éq. 2-2

Son amplitude est retrouvée en calculant le module du signal :

$$A = |s(t)|$$

Éq. 2-3

On peut alors généraliser cette notion en écrivant tout signal  $s(t)$  comme une fonction oscillante pour laquelle la fréquence varie avec le temps, modulée par une amplitude qui elle aussi dépend du temps.

On a alors :

$$s(t) = A(t) \cos(2\pi\Phi(t))$$

Éq. 2-4

$A(t)$  définit l'amplitude instantanée du signal et la dérivée temporelle de  $\Phi(t)$  est la fréquence instantanée du signal. La décomposition du signal selon l'Éq. 2-4 n'est pas unique et une décomposition particulière est obtenue en introduisant le concept de signal analytique. Le signal analytique est en fait le prolongement du signal réel dans le plan complexe. Il s'obtient en forçant à zéro les valeurs du spectre du signal réel correspondant aux fréquences négatives alors que celles correspondantes aux fréquences positives sont multipliées par deux, de manière à conserver l'énergie globale contenue dans le signal. En annulant les valeurs du spectre correspondantes aux fréquences négatives, on divise par deux la bande spectrale, ce qui équivaut à multiplier par deux le pas d'échantillonnage du signal réel. La description du signal analytique nécessite donc deux fois moins d'échantillons que celle du signal réel. Par contre, à chaque échantillon en temps, on associe deux valeurs puisque le signal analytique est complexe et on décrit simultanément la partie réelle et la partie imaginaire du signal. L'information n'a donc pas été annulée mais simplement redistribuée. On a alors :

$$z(t) = A(t) \exp(2i\pi\Phi(t))$$

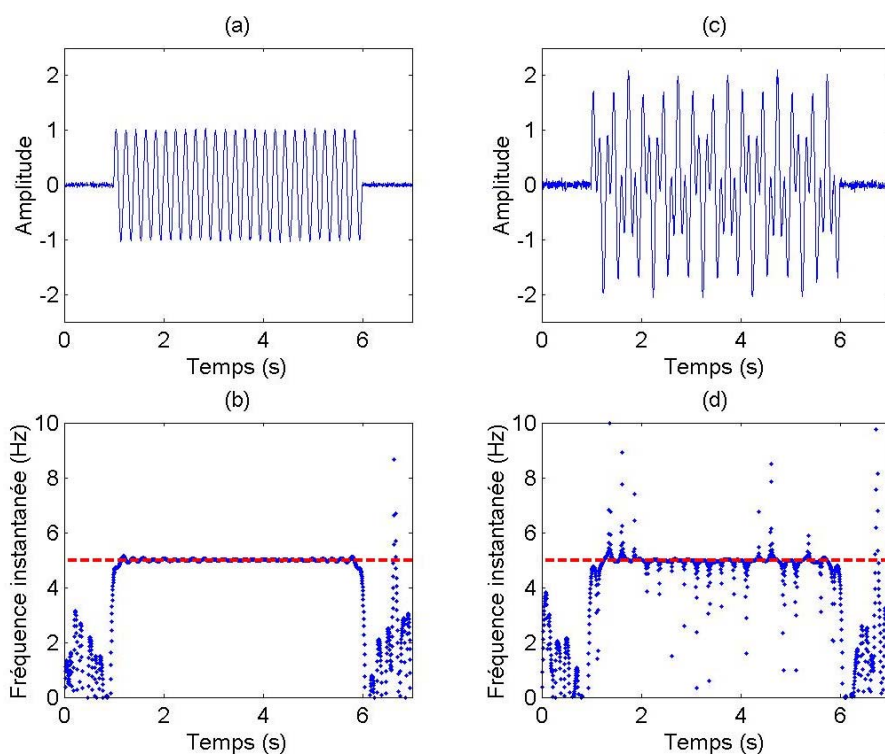
Éq. 2-5

Le signal  $s(t)$  se retrouve en prenant la partie réelle du signal analytique alors que la partie imaginaire est le signal en quadrature avec  $s(t)$ . La dérivée temporelle de la phase du signal analytique est la fréquence instantanée du signal et son module est son amplitude instantanée. Lorsque les propriétés fréquentielles du signal varient en fonction du temps, il devient commode d'introduire ces concepts qui caractérisent un comportement local du signal. Son calcul n'a donc de sens que si localement, autour du temps  $t$ , une seule composante ondulatoire est présente. Dans l'exemple ci-dessous, on a calculé la fréquence instantanée dans deux cas différents :

1<sup>er</sup> cas : le signal est une oscillation pure, de fréquence  $\nu_0 = 5\text{Hz}$  (**Fig. 2-2-(a)**).

2<sup>ème</sup> cas : le signal est la somme de deux oscillations pures de fréquences  $\nu_1 = 3\text{Hz}$  et  $\nu_2 = 7\text{Hz}$  (**Fig. 2-2-(c)**).

Sur les figures **Fig. 2-2-(b)** et **Fig. 2-2-(d)**, on constate que l'évolution de la fréquence instantanée est identique dans les deux cas. Le deuxième signal admet pour fréquence instantanée la valeur moyenne  $\nu(t) = (\nu_1 + \nu_2)/2$ .



**Fig. 2-2 :** (a) Sinusoïde seule ( $\nu_0 = 5\text{Hz}$ ). (b) Fréquence instantanée calculée pour (a). (c) Somme de deux sinusoïdes ( $\nu_1 = 3\text{Hz}, \nu_2 = 7\text{Hz}$ ). (d) Fréquence instantanée calculée pour (c).

Comme le montre la **Fig. 2-2**, dans le cas où plusieurs composantes interfèrent, le calcul de la fréquence instantanée ne suffit plus à décrire correctement le contenu spectral local du signal puisqu'il n'est pas capable d'identifier la présence simultanée de plusieurs composantes. La fréquence instantanée  $\nu(t)$  ne sera alors qu'une valeur moyenne entre toutes les fréquences qui composent le signal au temps  $t$ . On atteint ici les limites du concept de fréquence instantanée et d'autres décompositions capables de refléter simultanément le comportement temporel et fréquentiel du signal doivent être introduites.

Les prochaines sections introduisent les différents types de décompositions temps-fréquence d'un signal ainsi que les grands axes de recherche qui ont permis de mettre en place ces décompositions. Les avantages et les inconvénients de chacune des décompositions seront discutés. Nous expliquerons

également de l'utilité d'une telle décomposition dans le cadre de notre étude, ce qui nous amènera à choisir celle qui nous semble être la plus adaptée au problème que nous avons à résoudre.

### ***La transformée de Fourier à court-terme et le Spectrogramme.***

La transformée de Fourier à court-terme est une adaptation directe de la transformée de Fourier classique à l'étude de signaux non-stationnaires. L'analyse spectrale est répétée de nombreuses fois sur des domaines limités en temps par l'introduction d'une fenêtre temporelle glissante le long du signal. L'hypothèse de base est que localement, sur la fenêtre de temps considéré, les conditions de stationnarité du signal sont vérifiées. Les fonctions sinus et cosinus qui avaient une durée infinie dans l'analyse classique sont maintenant limitées temporellement par la fenêtre d'analyse  $h(t)$  et autour de chaque cellule (*temps, fréquence*), l'amplitude de la projection du signal sur une ondelette élémentaire, dont les caractéristiques sont entièrement données par la fenêtre d'analyse, est calculée. Une analyse similaire peut être menée dans l'espace des fréquences.  $H(v)$ , défini par la transformée de Fourier de  $h(t)$ , joue alors le rôle de filtre dans le domaine spectral. Différents types de fenêtres glissantes peuvent être utilisés et leurs caractéristiques doivent être définies en fonction de la nature des informations recherchées. Dans tous les cas, et selon le principe d'Heisenberg-Gabor, l'encombrement temporel  $\Delta t$  et fréquentiel  $\Delta v$  des différentes composantes ondulatoires qui composent le signal seront directement liés par la relation  $\Delta t \Delta v \geq 1/4\pi$ . Ces encombrements sont donnés par les moments centrés d'ordre 2 et définissent l'étendue de la localisation temporelle et fréquentielle du signal. C'est Gabor (1946) qui démontra le premier ces relations dans le cadre de la théorie des communications, en s'appuyant sur celle de la mécanique quantique. Il montre également que si le signal étudié est gaussien, l'inégalité d'Heisenberg-Gabor devient égalité. On dit souvent qu'il est impossible de localiser un signal simultanément avec une infime précision en temps et en fréquence. Il faut bien comprendre que ce principe n'est pas une limitation à notre connaissance mais qu'il décrit la réalité, à savoir qu'un signal ne peut pas être concentré à la fois en temps et en fréquence. Quelle que soit la décomposition temps-fréquence, ce principe est toujours vrai et constitue les limites de notre connaissance. En 1946, Gabor avait illustré ce principe en pavant le plan temps-fréquence par des rectangles de côtés  $\Delta t$  et  $\Delta f$ . Ces rectangles avaient tous une aire constante et étaient également tous identiques. Aujourd'hui, le principe reste évidemment toujours vrai mais les mêmes rectangles ont pris des formes très différentes suivant la fréquence d'analyse et aussi le type d'ondelettes sur lesquelles on projette le signal. La résolution temporelle avec laquelle on localise les différentes composantes sera donc inversement proportionnelle à sa résolution fréquentielle. Ce principe a des conséquences directes en terme de séparation d'ondes qui sont que: lorsque deux phases sismiques interfèrent dans le domaine temporel ou fréquentiel, il sera impossible de les séparer si leur éloignement temporel est inférieur à  $\Delta t$  ou leur éloignement fréquentiel inférieur à  $\Delta f$ .

Le Spectrogramme constitue la version quadratique de la transformée de Fourier à court-terme et est construit à partir de son module. L'information relative à la phase du signal est perdue et le Spectrogramme ne peut pas être utilisé si l'on veut mettre en place un post-traitement basé sur l'information liée à la phase du signal. En terme de résolution, le Spectrogramme n'est en rien différent de celle de la transformée de Fourier à court terme.

### ***La transformée en Ondelettes et le Scalogramme.***

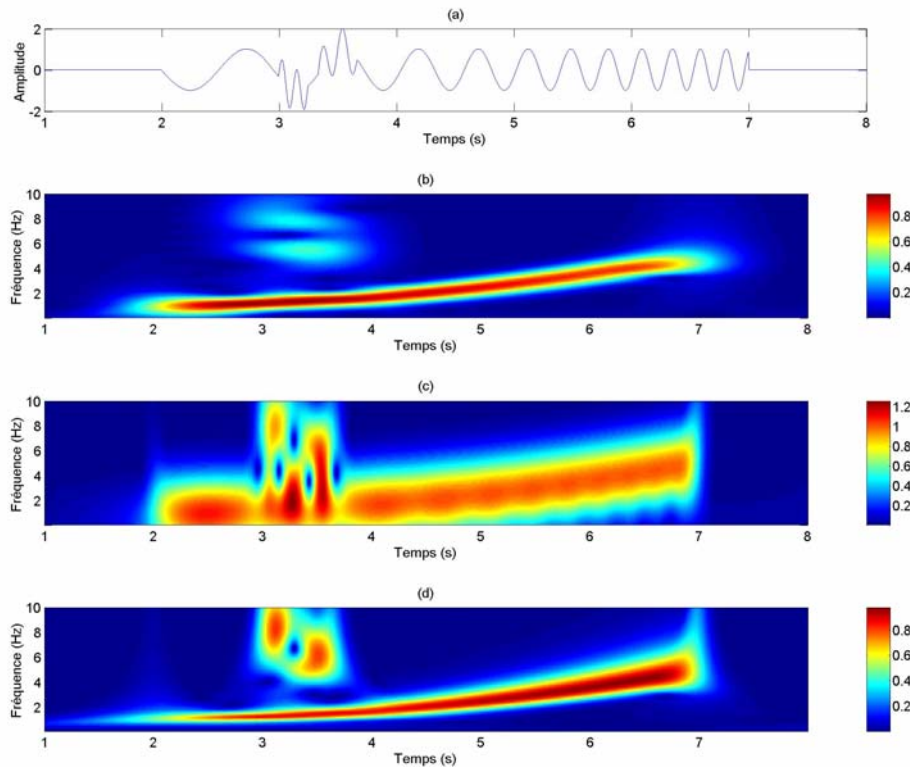
Une fenêtre temporelle étroite permettra de localiser précisément les variations brutales du signal, tel que l'arrivée d'une phase impulsive, mais sera alors trop étroite pour caractériser avec la même précision les composantes très basse fréquence du signal. Une fenêtre plus large devrait alors être utilisée mais ceci dégradera très largement la résolution temporelle. C'est Morlet (1975) qui introduisit le premier la transformée en ondelette. Plutôt que de parcourir le signal avec une fenêtre d'analyse de largeur fixe dans laquelle on fait varier le nombre d'oscillation en fonction de la fréquence d'analyse, il eut l'idée d'utiliser une fenêtre de largeur variable dans laquelle on garderait le nombre d'oscillations fixe. Une fenêtre d'observation étroite est utilisée pour regarder et décrire les composantes impulsives de haute fréquence et de courte durée et une fenêtre plus large est utilisée pour regarder les composantes plus basse fréquence, de durée plus longue. Le compromis résolution temporelle / résolution fréquentielle qui existait dans la transformée de Fourier à court-terme est toujours présent mais est continuellement adaptée à la fréquence d'analyse. On qualifie aussi ce type d'analyse de '*multi-résolution*', puisqu'on regarde le signal à de multiples échelles. Une fonction '*mère*' est alors introduite de laquelle on déduit, par translation et dilatation, l'ensemble des ondelettes '*filles*' utilisées pour l'analyse aux différentes échelles. Comme pour la transformée de Fourier à court-terme, la transformée en ondelette admet une expression dans l'espace des fréquences. On réalise alors ce qu'on appelle une analyse à *Q-constant*, où *Q* est défini comme l'inverse de la bande relative des ondelettes filtrantes ( $Q = \nu_0 / B$ , où  $\nu_0$  est la fréquence centrale du filtre et *B* est sa largeur de bande). La transformée en ondelettes admet une largeur relative de bande constante tout au long du traitement. Dziewonski (1969) utilisa une analyse que l'on qualifierait aujourd'hui de transformée en ondelettes pour l'identification et la séparation des différents modes des ondes de Rayleigh présentes sur des enregistrements téléseismiques. Depuis, les mathématiciens et les physiciens ont travaillé ensemble pour apporter une base mathématique solide à cette transformation et rendre son utilisation accessible aux non-spécialistes de l'analyse en ondelettes. Aujourd'hui, les ondelettes connaissent de nombreux domaines d'applications tels que la mécanique, l'imagerie médicale, l'astronomie mais aussi le traitement de l'image, la compression de données ou encore l'étude des fractales, justement définis par leur autosimilarité à différentes échelles. Les ondelettes ont connu un très large succès et ont permis à l'ensemble de la communauté scientifique de tirer profit de ce nouvel outil. Il faut cependant rester

prudent face à une utilisation trop hâtive et systématique des ondelettes avant même de savoir si elles sont adaptées aux caractéristiques du signal que l'on cherche à décrire. Nous conseillons des ouvrages tel que celui de Flandrin (1998) ou Truchetet (1998) au lecteur désireux d'aller plus loin dans l'analyse en ondelettes. Les bases mathématiques y sont présentées ainsi qu'un inventaire exhaustif des ondelettes principalement utilisées aujourd'hui.

Comme pour la transformée de Fourier à court-terme, la transformée en ondelettes admet une version quadratique que l'on appelle le Scalogramme.

### ***Illustration***

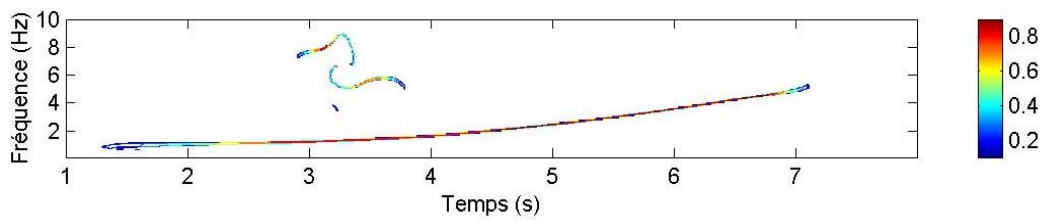
L'exemple synthétique suivant montre les principaux avantages et les inconvénients de la transformée de Fourier à court-terme et de la transformée en ondelette. Nous avons systématiquement représenté les quantités quadratiques résultant de ces deux transformations du signal. Le signal étudié a été construit en superposant une variation quadratique de fréquence (entre  $t = 2s.$  et  $t = 7s.$ ), et deux signaux impulsionnels de courte durée. Le premier est localisé autour de  $t = 3s.$  et présente un contenu fréquentiel proche de  $8Hz$  et le deuxième est localisé autour de  $t = 3.5s.$  et présente un contenu fréquentiel proche de  $6Hz$ . Le signal somme de ces trois composantes est représenté **Fig. 2-3**–(a). Le Spectrogramme et le Scalogramme ont été calculés pour ce signal en utilisant leurs expressions écrites dans le domaine fréquentiel. D'abord, un Spectrogramme utilisant un filtre de largeur de bande égale à  $1Hz$  a été calculé (**Fig. 2-3**–(b)). La modulation en fréquence est parfaitement localisée mais le filtre utilisé est trop étroit pour détecter correctement les deux signaux impulsionnels. Le même calcul a alors été réalisé en augmentant la largeur du filtre en fréquence, de manière à pouvoir également détecter les impulsions hautes fréquences contenues dans le signal (**Fig. 2-3**–(c)). Mais l'encombrement fréquentiel des différentes composantes devient alors très grand et on commence à voir apparaître des termes d'interférences entre ces composantes. Le Scalogramme a également été calculé et permet, quant à lui, de décomposer parfaitement le signal selon les trois composantes élémentaires attendues (**Fig. 2-3**–(d)). Cependant, l'effet du fenêtrage variable est clairement visible sur la modulation en fréquence: on voit que la résolution fréquentielle diminue pour les haute fréquence alors qu'elle demeurerait constante pour le Spectrogramme. Si différentes phases interfèrent à haute fréquence, le Scalogramme, comparativement au Spectrogramme, a un pouvoir de séparation plus faible. Cet exemple très simple est évidemment loin de refléter toute la complexité présente dans les sismogrammes réels que nous aurons à caractériser mais il illustre néanmoins les avantages et inconvénients du Spectrogramme et du Scalogramme. Il permet également d'illustrer le compromis temps-fréquence que nous devons nous résoudre à accepter et auquel nous aurons à faire face lors de l'étude de sismogrammes réels.



**Fig. 2-3 : (a) Signal. (b) Spectrogram / largeur de bande constante : 1Hz. (c) Spectrogram / largeur de bande constante : 5Hz (d) Scalogramme normalisé / largeur de bande relative : 0.5.**

### *Les lignes de crêtes.*

Le Spectrogramme et le Scalogramme utilisent respectivement le module de la transformée de Fourier à court-terme et de la transformée en ondelettes, et donnent une mesure de la densité d'énergie du signal en fonction du temps et de la fréquence. L'algorithme des lignes de crêtes (Delprat et al., 1992 ; Mallat, 1999) utilise une information supplémentaire puisqu'il prend également en compte l'information portée par la phase de ces deux transformées. Les lignes de crêtes sont alors calculées en ne sélectionnant que les zones du plan temps-fréquence pour lesquelles la phase de la transformée à court-terme ou en ondelettes est stationnaire. Les lignes de crêtes ont été extraites du Scalogramme représenté sur la **Fig. 2-3-(d)** et sont représentées sur la **Fig. 2-4**. L'apport en terme de localisation des différentes composantes dans le plan temps-fréquence est évident. L'extraction des lignes de crêtes permet de réduire l'étalement temporel et fréquentiel dus à l'utilisation d'une fenêtre d'observation à court-terme.



**Fig. 2-4 : Lignes de crêtes pour le signal représenté en Fig. 2-3-(a). Ces lignes de crêtes ont été extraites du Scalogramme présenté Fig. 2-3-(c).**

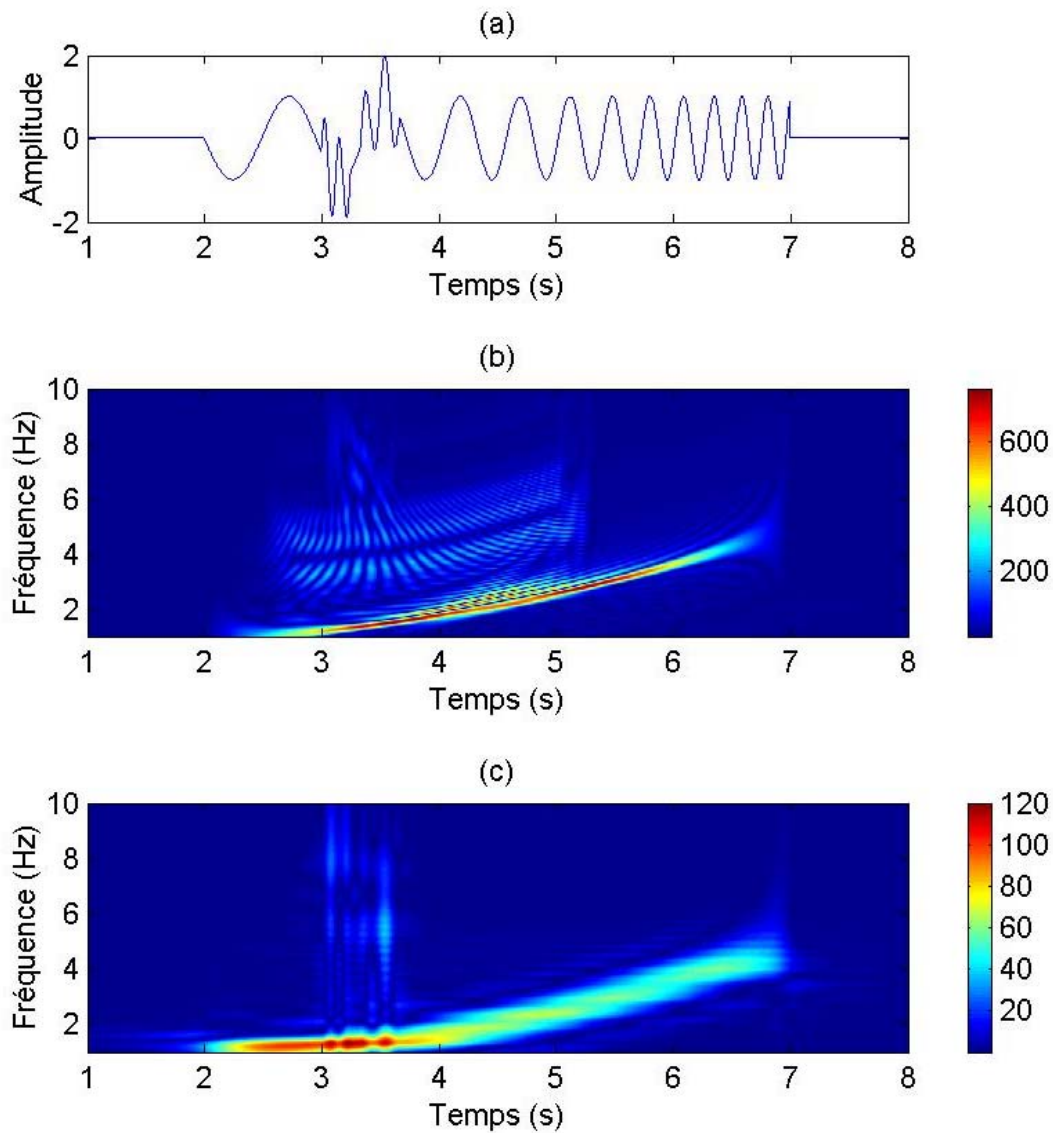
A la transition temporelle entre les deux composantes haute fréquence du signal, on observe un biais dans la localisation des lignes de crêtes, qui ne reflète pas exactement le contenu fréquentiel des deux signaux impulsionnels (6 et 8Hz). Ces biais dans la localisation sont dus aux interférences entre ces deux composantes, interférences qui étaient déjà présentes dans le Scalogramme (Fig. 2-3-(c)). Les lignes de crêtes présentent cependant une énergie maximum autour des fréquences théoriques utilisées pour construire les signaux.

#### ***La distribution de Wigner-Ville et ses versions lissées.***

L'ensemble des représentations temps-fréquence que nous venons de détailler sont basées sur l'estimation de poids calculés en projetant le signal sur une base de fonction préalablement définie. Les distributions d'énergie visent quant à elles, à répartir l'énergie de façon conjointe en temps et en fréquence. La classe de Cohen regroupe l'ensemble des décompositions temps-fréquence bilinéaires, invariantes par translation en temps et en fréquence. La distribution de Wigner-Ville appartient à la classe de Cohen et est certainement celle qui a été le plus étudiée du fait qu'elle vérifie un nombre exceptionnel de 'bonnes' propriétés mathématiques. Elle fut proposée pour la première fois par J. Ville en 1948 qui s'inspira des travaux réalisés par E. P. Wigner en mécanique quantique. Pour faire une analogie avec les décompositions temps-fréquence linéaires qui nous sont peut être plus familières, la distribution de Wigner-Ville peut être vue comme une transformée de Fourier à court-terme dans laquelle la fenêtre d'observation est continuellement adaptée au signal puisqu'il ne s'agit que du signal lui-même retourné dans le temps. Parmi les nombreuses propriétés mathématiques que vérifie la distribution de Wigner-Ville, celles auxquelles nous sommes le plus sensible sont les suivantes : (a) elle prend toujours des valeurs réelles et (b) elle est invariante par translation en temps et en fréquence. D'autre part, (c) elle conserve entièrement le support temporel d'un signal, au sens où elle prend des valeurs non-nulles uniquement lorsque le signal est non-nul. De par l'utilisation d'une fenêtre d'observation, les transformées à court-terme décrites précédemment ne respectent pas cette propriété. De plus, (d) la distribution de Wigner-Ville possède la capacité de parfaitement localiser les modulations linéaires de fréquence, ce qui est intéressant pour l'étude de phénomènes dispersifs. D'un autre côté, la distribution de Wigner-Ville possède certaines mauvaises propriétés qui peuvent se

révéler gênantes. Par exemple, une de ses caractéristiques est de prendre des valeurs négatives, ce qui pour une distribution d'énergie est plus que difficile à interpréter. Mais sa caractéristique la plus dramatique est, comme nous l'avons reporté précédemment, de ne pas répondre à un principe de superposition linéaire, ce qui veut dire que la distribution de Wigner-Ville de la somme de deux signaux n'est pas égale à la somme des distributions de chacun des signaux. La distribution de Wigner-Ville estimée autour de  $(t, \nu)$  utilise l'intégralité du signal, entre son instant initial d'enregistrement et son instant final. Il n'est donc pas étonnant de retrouver des contributions énergétiques (aussi appelées termes d'interférences) provenant de l'interaction entre l'ensemble des multiples composantes présentes dans le signal. De plus, on peut montrer que la distribution de Wigner-Ville d'un signal obtenu par sommation de deux composantes élémentaires d'amplitudes égales présente des termes d'interférences dont le niveau maximal peut excéder d'un facteur deux celui de chacun des signaux élémentaires. Il devient alors ardu de distinguer les zones du plan temps-fréquence pour lesquelles l'information énergétique est propre au signal étudié de celles liées aux interactions entre les différentes composantes élémentaires. De nombreux travaux eurent pour objectif de cerner le mécanisme de génération de ces termes d'interférences (F. Hlawatsch, 1984, Flandrin, 1998). Ils ont permis d'avoir une meilleure connaissance de leurs structures et donc, de proposer des techniques visant à réduire leurs intensités. La première technique consiste à ne travailler qu'avec le signal analytique, ce qui a pour effet de réduire les termes d'interférences dus aux interactions entre les fréquences positives et les fréquences négatives du signal. Concernant les termes d'interférences dus à l'interaction entre toutes les fréquences positives contenues dans le signal, contrairement aux termes '*signal*' qui sont caractérisés par des structures régulières dans le plan temps-fréquence, ils ont la particularité de présenter des structures fortement oscillantes. L'introduction d'une fenêtre d'analyse à court-terme, selon la direction temporelle ou fréquentielle, permet alors de limiter la présence de ces termes d'interférences aux seules composantes qui sont simultanément présentes dans la fenêtre d'observation et constitue un moyen de les réduire. Cependant, l'introduction d'une telle fenêtre n'est pas sans conséquences sur la distribution d'énergie puisque avec elle, on introduit également une dégradation dans la précision de localisation des termes '*signal*' dans le plan temps-fréquence. On se retrouve alors avec des contraintes du même type que celles rencontrées dans les décompositions atomiques du signal et inhérentes à l'utilisation d'une fenêtre d'observation à court-terme. Une fenêtre temporelle étroite permettra d'atténuer fortement les termes d'interférences puisqu'on réduit considérablement le nombre de composantes ondulatoires présentes simultanément. Mais le principe d'Heisenberg-Gabor nous rappelle alors que l'utilisation d'une fenêtre étroite dégrade également fortement la résolution en fréquence. Nous avons calculé la distribution de Wigner-Ville (**Fig. 2-5-(b)**) du signal synthétique précédent ainsi que sa version lissée (**Fig. 2-5-(c)**). Pour ce lissage, nous avons utilisé la distribution Choi-Williams, c'est à dire que l'on utilise une fonction gaussienne comme fonction de lissage temporel. Le terme  $\sigma$  quantifie le degré de lissage : plus  $\sigma$  est faible et plus on réduit les termes d'interférences (on a utilisé  $\sigma = 1$ ).





**Fig. 2-5 : (a) Signal synthétique. (b) Distribution de Wigner-Ville. (c) Distribution de Choi-Williams ( $\sigma = 1$ ).**

Avec la distribution de Wigner-Ville, la modulation quadratique de fréquence est bien localisée et est très nettement marquée. La présence des deux signaux impulsionnels n'est pas mise en évidence. Ces composantes sont très largement masquées par la présence des termes d'interférences. Après lissage, ces termes sont atténués mais la résolution sur la localisation de la modulation en fréquence est moins bonne. Le niveau d'énergie des deux signaux impulsionnels a quant à lui été renforcé, mais reste néanmoins de très faible amplitude. Lors de l'analyse de signaux réels, où du bruit se rajoute au signal, la présence des termes d'interférences peut conduire à une mauvaise caractérisation de l'évolution fréquentielle des différentes composantes du signal.

## *Les méthodes paramétriques*

D'autres méthodes que nous nous contenterons de citer, dites '*paramétriques*', peuvent également être utilisées pour connaître le comportement spectral instantané du signal. De telles méthodes nécessitent d'avoir des informations '*a priori*' sur le signal et sont plutôt utilisées dans un objectif de codage de l'information. Ce sont donc des méthodes qui ne cherchent pas à obtenir une description fine et détaillée de l'information mais qui visent plutôt à en extraire l'essentiel et à éliminer toute redondance dans la description du signal. Ceci n'est pas dans nos objectifs et nous invitons donc le lecteur intéressé par ces méthodes à se reporter à l'ouvrage de Michaut (1992) et à consulter les fiches descriptives figurant dans Flandrin et Martin (1992).

### **2.1.3. Discussions et Conclusions**

Nous avons détaillé différentes façons d'accéder à la répartition énergétique d'un signal en fonction du temps et de la fréquence. De cette synthèse, il est important de noter qu'il n'a pas été mis en avant une décomposition '*magique*' qui ne posséderait que des avantages sans qu'aucun inconvénient n'ait été détecté. Si les temps de calculs que nous consacrons à nos traitements n'étaient pas un obstacle, chacune des décompositions temps-fréquence présentées ci-dessus devraient être calculées à chaque fois que nous cherchons à caractériser un signal. Les informations apportées par chacune des décompositions en terme d'identification et de séparation des différentes phases ainsi qu'en terme d'estimation de leur contenu fréquentiel devraient être mises en commun de manière à profiter des avantages offerts par chacune des décompositions.

Ici, nous choisirons une décomposition particulière qui nous semble être la plus adaptée à nos besoins. Il faut alors commencer par clairement les définir.

- 1<sup>er</sup> objectif : nous attendons d'une décomposition temps-fréquence d'être capable de **séparer** des phases sismiques qui **interfèrent** à des temps de propagation proches.
- 2<sup>ème</sup> objectif : nous attendons également de cette décomposition d'**identifier**, avec précision, **la fréquence dominante** de chacune de ces phases.

Contrairement aux décompositions atomiques du signal, les distributions d'énergie et plus particulièrement la distribution de Wigner-Ville ne nécessite pas d'hypothèse de stationnarité locale sur le signal. D'autre part, il a été montré pour cette distribution que l'encombrement temps-fréquence gouverné par l'inégalité de Heisenberg-Gabor était deux fois moins grand que l'encombrement minimum du Spectrogramme (Flandrin, 1998 ; Claasen et al., 1984). Cependant, il est clair que cette distribution n'est pas directement applicable à nos signaux dans son état originel. Les sismogrammes que nous cherchons à décrire sont justement caractérisés par une grande complexité et la présence d'un

grand nombre de composantes ondulatoires. La présence massive des termes d'interférences dès que plus d'une phase compose le signal rend une interprétation directe difficile. Des versions lissées de la distribution de Wigner-Ville, en temps ou en fréquence, permettent alors d'atténuer ces termes mais il faut accepter de perdre en résolution de localisation de l'énergie. La pseudo-distribution de Wigner-Ville lissée, qui utilise un lissage séparé, en temps et en fréquence, permet alors de rendre indépendant la résolution temporelle et fréquentielle, au détriment de la perte d'un certain nombre de propriétés théoriques qui rendaient la distribution de Wigner-Ville si attrayante. D'autre part, tout lissage efficace nécessite d'avoir une bonne connaissance de la structure des termes d'interférences de manière à introduire des lissages assez forts, capables de réduire suffisamment ces termes, et à être certain de ne pas les interpréter comme du signal utile. Un a priori sur les connaissances de la géométrie des termes d'interférences doit donc être fait et le type de lissage utilisé, directement adapté à cette géométrie. D'un autre côté, un lissage aura pour effet de délocaliser fortement l'énergie, ce qui ne permettra pas de répondre à notre deuxième objectif. Nous abandonnons ainsi les distributions d'énergie pour nous concentrer sur les décompositions linéaires, même si nous savons qu'en théorie, ces dernières ont un pouvoir de résolution plus faible.

La transformée de Fourier à court-terme, et donc le Spectrogramme, présentent l'avantage d'être très simples à mettre en œuvre. L'utilisation d'une fenêtre d'observation à court-terme nécessite cependant qu'une hypothèse de stationnarité locale soit faite sur le signal. Les caractéristiques de cette fenêtre d'observation sont fixées au début du traitement et une même fenêtre d'analyse est donc utilisée, quel que soit le contenu fréquentiel des composantes ondulatoires en présence. Nous nous intéressons dans cette thèse aux ondes régionales dont le contenu fréquentiel peut varier entre 1 et 10Hz. Nous pensons alors que la gamme de fréquence étudiée est trop large pour pouvoir la décrire correctement en utilisant une fenêtre d'analyse dont les caractéristiques sont fixes. L'approche '*multi-résolution*', dont le principe est d'adapter continuellement la fenêtre d'analyse aux différentes fréquences permet d'aller plus loin dans l'analyse de l'information. Une analyse en ondelettes sera plus adaptée à caractériser les non-stationnarités rapides présentes dans les signaux. D'un autre côté, nous savons que le pouvoir de résolution fréquentiel du Scalogramme diminue lorsque la fréquence augmente, ce qui réduit la capacité du Scalogramme à séparer des composantes haute fréquence ayant des temps de propagation voisins. Cependant, les phases que nous identifierons à partir de la décomposition temps-fréquence du signal seront ensuite décomposées dans l'espace des nombres d'onde. Nous verrons alors que dans cet espace, la séparation en nombre d'onde est d'autant plus facile que le contenu fréquentiel des ondes est grand. Si plusieurs ondelettes interfèrent à très basse fréquence et qu'elles n'ont pas été séparées par une analyse temps-fréquence, il y a peu de chances pour qu'elles le soient par une décomposition en nombres d'ondes.

*Nous préférons donc privilégier la séparation des ondes à basse fréquence ainsi que la bonne localisation et la séparation temporelle des phases sismiques plus haute fréquence.*

Notre deuxième objectif est d'estimer précisément la fréquence dominante de chacune des phases suffisamment énergétiques et identifiées dans le plan temps-fréquence. Nous avons montré que l'utilisation d'une fenêtre d'observation à court-terme induisait un étalement de l'énergie dans le plan temps-fréquence. La recherche des lignes de crêtes permet de se focaliser directement sur les zones du plan temps-fréquence les plus énergétiques sans pour autant que soit retenues celles dues à l'utilisation d'une fenêtre d'analyse à court-terme. Nous ne gagnons rien en terme de résolution mais nous gagnons énormément en terme d'extraction du signal utile.

*La décomposition en lignes de crêtes répond donc à notre deuxième objectif, qui est une estimation précise de la fréquence des différentes composantes ondulatoires contenues dans le signal.*

***La décomposition temps-fréquence que nous utiliserons pour nos traitements sera donc celle qui présente le signal selon ses lignes de crêtes. Ces lignes de crêtes seront calculées à partir du Scalogramme, calculé dans le domaine fréquentiel.***

L'algorithme permettant de retrouver les lignes de crêtes ainsi que son processus de mise en œuvre seront détaillés dans le paragraphe 2.3.1 de ce chapitre.

## 2.2. ... à la séparation d'ondes dans le domaine spatial.

### **2.2.1. Analogies temps-espace**

Nous avons vu que l'échantillonnage temporel d'un signal permettait, par transformée de Fourier à une dimension, de retrouver les poids associés à la projection du signal sur les fonctions de base que sont les sinus et cosinus. On retrouve ainsi la répartition énergétique des différentes fréquences temporelles qui composent le signal. De même, l'échantillonnage spatial du champ d'onde permet, par transformée de Fourier à deux dimensions, de déterminer la répartition énergétique des différentes fréquences spatiales qui sont contenues dans le signal. Les fonctions de bases sont toujours les sinus et les cosinus et pour chaque fréquence spatiale, la transformée de Fourier à deux dimensions vise à retrouver les poids associés à la projection de l'ensemble des signaux sur ces fonctions de base. On peut alors faire une analogie complète entre l'ensemble des variables qui décrivent l'évolution temporelle du champ d'onde et celles qui décrivent son évolution spatiale. Ces analogies sont données dans le Tableau 2-1.

<u><i>Transformée de Fourier 1Dimension</i></u>	<u><i>Transformée de Fourier 2Dimension</i></u>
$t$ , le temps	$\vec{r}$ , le vecteur position
$\nu$ , la fréquence temporelle	$\vec{\sigma}$ , la fréquence spatiale
$T = \frac{1}{\nu}$ , la période	$\lambda = \frac{1}{\sigma}$ , la longueur d'onde spatiale
$\omega = 2\pi\nu$ , la pulsation	$\vec{k} = 2\pi\vec{\sigma}$ , le vecteur nombre d'onde

**Tableau 2-1 : Analogies entre le domaine temporel et le domaine spatial**

### 2.2.2. Les objectifs d'une décomposition en nombre d'onde

Une antenne sismologique permet d'enregistrer les ondes émises lors d'un séisme en différents points de l'espace et permet donc d'introduire une redondance dans l'observation de l'information. Supposons alors que la distance qui sépare les différents points d'enregistrement soit suffisamment petite pour pouvoir observer une cohérence du champ d'onde entre tous les capteurs de l'antenne pris deux à deux. On est alors en mesure de construire, grâce à une transformée de Fourier à deux dimensions des signaux enregistrés par l'antenne, un signal unique pour lequel la partie '*signal*', caractérisée par une propagation cohérente d'un capteur à l'autre sera renforcée et la partie '*bruit*', caractéristique d'un capteur isolé se trouvera atténuée. Globalement, le rapport signal sur bruit de ce signal aura donc augmenté et cette augmentation sera d'autant plus forte que le nombre de capteurs sera grand. Comme nous l'avons signalé dans le chapitre I, ce fut un des premiers objectifs des antennes sismologiques puisqu'il s'agissait alors d'être capable de détecter à distances téléseismiques, des événements de magnitudes aussi faibles que possible, notamment dans le cadre de la surveillance des essais nucléaires. Aujourd'hui, les antennes continuent à être utilisées à des fins de surveillance et de détection, mais leurs applications se sont également très largement étendues à d'autres domaines de la sismologie.

Dans le cadre de cette thèse, nous utiliserons les antennes sismologiques comme outils d'analyse des sismogrammes régionaux. Nous cherchons à caractériser les paramètres de propagation de chacune des phases suffisamment énergétiques qui se propagent à travers l'antenne. En d'autres termes, nous ne cherchons pas directement à augmenter le rapport signal sur bruit des signaux mais nous cherchons les vecteurs nombre d'ondes qui conduisent à cette augmentation. Ces informations, combinées avec celles issues de la décomposition temps-fréquence de nos signaux, nous permettra de connaître:

- les directions de propagation des différentes ondes qui sont aussi celles des vecteurs nombres d'ondes.
- les vitesses apparentes de propagation des différentes ondes qui sont obtenues en combinant le module des vecteurs nombres d'ondes et la fréquence dominante des différents champs d'onde.

Les différentes méthodes de décomposition en nombre d'onde sont multiples et variées. Le prochain paragraphe constitue une synthèse bibliographique rapide des différentes méthodes plus ou moins sophistiquées qui permettent de faire une décomposition des signaux dans l'espace des nombres d'onde.

### 2.2.3. Les différentes méthodes d'analyse en antenne

#### *Les formations de voies classiques*

La première classe est constituée des méthodes dites de '*retard-sommation*' ou '*Beam Forming*'. Elle consiste à rechercher les décalages temporels à appliquer à chacun des signaux enregistrés par l'antenne ('*les retards*') permettant de générer un signal somme ('*la sommation*') maximum. L'inversion de ces retards temporels permet de retrouver les paramètres de propagation des différentes ondes étudiées. Ces retards peuvent être retrouvés en faisant une recherche systématique parmi tous les jeux de décalages possibles et en retenant celui qui génère un signal somme maximum. Gaffet et al. (1998) utilise cette technique pour déterminer les paramètres de propagation des phases secondaires présentes dans la coda des sismogrammes régionaux. Une autre manière qui ne nécessite pas une exploration systématique dans le domaine des nombres d'ondes est réalisée en estimant les fonctions d'intercorrélation entre les différents capteurs pris deux à deux. Les retards sont alors obtenus en cherchant pour quels décalages ces fonctions sont maximales. Cette méthode fonctionne de façon optimale lorsque les fonctions d'intercorrélation présentent un seul pic bien identifié. Ceci n'est plus le cas lorsque par exemple la longueur d'onde des signaux est très petite devant la dimension spatiale de l'antenne. Les signaux présentent alors une période d'oscillation très supérieure aux décalages temporels que l'on recherche et les fonctions d'intercorrélation peuvent présenter plusieurs pics d'amplitudes comparables: il en résulte une ambiguïté dans le choix du pic. Cansi et al. (1993, 1995) proposent alors une solution pour pallier ce type d'ambiguïté en introduisant l'algorithme '*PMCC, Progressive Multiple Channel Correlation*' qui consiste à faire une recherche progressive des paramètres de propagation en initiant l'analyse des fonctions d'intercorrélation pour une sous-antenne de l'antenne globale, suffisamment petite pour qu'il n'y ait pas d'ambiguïté. *PMCC* est aujourd'hui utilisé comme outil de détection temps réel et d'analyse des signaux au Laboratoire de Détection et de Sismologie Opérationnelle à *Bruyères-le-Châtel* (LDG/CEA). Cependant, cette dernière méthode, développée dans le domaine temporel, a le désavantage de trouver les décalages temporels qui existent entre les différents signaux, au pas d'échantillonnage près. Il est alors d'usage de sur-échantillonner les signaux ce qui a pour effet de lisser les évolutions temps-azimut-vitesse ainsi retrouvées mais qui ne rajoute en aucun cas de la précision sur l'estimation des paramètres de propagation. Une autre alternative consiste alors à réaliser la décomposition non plus à partir des signaux eux-mêmes, mais de leurs transformations dans l'espace de Fourier. On travaille alors directement avec la phase des signaux qui contient toute l'information relative aux décalages temporels. Un des avantages de travailler directement dans le domaine des fréquences est que la phase n'est pas une quantité échantillonnée et si l'on respecte les limites fixées par le théorème de Shannon, le pas d'échantillonnage n'intervient plus sur la précision d'estimation des paramètres de propagation.

Fréquence par fréquence, on a donc une mesure de la phase et on est en capable d'estimer les paramètres de propagation relatifs à l'onde étudiée. Par contre, toute la difficulté réside alors dans la recherche de la bande de fréquence pour laquelle les phases sont suffisamment stables. D'autre part, la phase est une quantité dont les valeurs varient entre  $[-\pi; \pi]$ . Si les décalages temporels deviennent trop grand, la multiplicité des pics décrivant les fonctions d'intercorrélations se traduit en fréquence par des repliements de phase. Il en résulte une incertitude à  $2\pi$  près sur l'estimation de la phase. Une solution consiste alors à recalculer grossièrement l'ensemble des traces par rapport à la phase que l'on souhaite caractériser et rechercher les décalages résiduels de manière plus fine en se servant de l'information portée par la phase. Lorsque les décalages temporels que l'on recherche sont suffisamment petits devant la période d'oscillation des signaux (et ce sera notre cas), les repliements de phase ne sont pas observés. Kvaerna et Doornbos (1986) ont étendu la décomposition fréquence-nombre d'onde établie pour une fréquence particulière au cas large-bande en faisant une moyenne des décompositions obtenues fréquence par fréquence sur une gamme de fréquence plus ou moins large. Cette bande de fréquence est choisie par rapport à l'énergie relative des signaux qui y est contenue: ils montrent ainsi que cet effet de moyenne stabilise l'information relative aux paramètres de propagation (Mykkeltveit et al., 1990). L'outil de détection automatique adoptée par les sismologues du *Norsar* (Norvège) dans le cadre du CTBT (*'Comprehensive Test Ban Treaty'*) est basée sur l'estimateur fréquence-nombre d'onde large-bande décrit par Kvaerna et Doornbos. Citons également les travaux de Gupta (1990a, 1990b) qui utilise cette analyse large-bande et propose de surcroît un processus itératif dans l'analyse des sismogrammes. Il procède alors en deux temps en s'attachant à décrire d'abord les phases les plus énergétiques du signal de manière à pouvoir ensuite les soustraire des sismogrammes et mettre en valeur des phases secondaires, généralement caractérisées par des amplitudes trop faibles pour être directement détectées sur les sismogrammes originaux. Cette méthode doit cependant être utilisée avec prudence puisque si l'information soustraite aux signaux originaux est mal estimée, on risque d'en recréer par ailleurs et d'interpréter des phases qui n'ont aucune signification réelle.

Poussée à l'extrême, l'analyse large-bande devient une analyse *très* large-bande dans laquelle on choisit de moyenner le spectre en nombre d'onde sur toute la gamme de fréquence : il en résulte alors une estimation de ce spectre dans laquelle l'information relative aux vitesses de propagation a été sacrifiée (Nawab et al., 1985).

Que ce soit dans le domaine temporel ou dans le domaine fréquentiel, les méthodes basées sur les techniques de retard-sommation ont été modifiées et améliorées de manière à pouvoir augmenter leur capacité à séparer des arrivées multiples. Cependant, on atteint des limites lorsque les phases à séparer ont des paramètres de propagation très proches. En effet, concernant les techniques classiques de décomposition, le pouvoir de séparation d'une antenne est directement lié à sa configuration géométrique et est donc entièrement déterminé par sa fonction de transfert, plus particulièrement par la largeur à mi-hauteur du pic central de la fonction de transfert (voir chapitre I). Si deux ondes sont



caractérisées par des nombres d'onde séparés par une distance (dans l'espace des nombres d'ondes) inférieure à cette largeur, les pics correspondant à chacune des ondes se mélangeront et n'en formeront plus qu'un seul.

### ***Les méthodes haute-résolution***

Une deuxième classe de méthodes dites '*haute-résolution*' a alors permis de donner un nouvel essor aux analyses en antenne.

#### *Les méthodes du type 'Minimum variance'*

La plus connue est celle développée par Capon (1968, 1969) aussi appelée méthode du '*Minimum variance*'. Le filtre à deux dimensions qui fait passer des signaux enregistrés par chaque élément de l'antenne au signal final pour lequel le rapport signal sur bruit a été augmenté n'est plus une simple opération de retard puis sommation. Les coefficients du filtre sont obtenus en imposant une condition de variance minimum sur la quantité '*valeurs observées - valeurs calculées*' et à l'opposé de la méthode de retard-sommation, varient en fonction du nombre d'onde autour duquel on effectue le filtrage. Capon montre que son estimateur ne dépend pas tant de la fonction de transfert de l'antenne mais plutôt de l'énergie de la partie incohérente de signal contenue dans la fenêtre d'observation. Il montre par ailleurs que le pouvoir de séparation des ondes est meilleur que celui des méthodes conventionnelles. La méthode de Capon a également connu un très large succès puisqu'elle a été utilisée dans un grand nombre de travaux: on peut citer par exemple les travaux de Dainty et Toksöz (1990) qui l'utilisèrent pour scanner la coda de sismogrammes régionaux et déterminer quels types d'ondes la compose. La méthode de Capon a également été adaptée par Lacoss (1971) pour le déploiement des signaux dans l'espace de Fourier à une dimension. Ce dernier a montré que la méthode de '*minimum variance*' était plus efficace que la méthode classique lorsque l'objectif est de séparer des ondelettes dont le contenu spectral est très proche.

#### *Les méthodes de décompositions en composantes orthogonales*

Une deuxième classe de méthodes que nous voudrions introduire ici, peut-être un peu moins connues que les méthodes du type '*Capon*', est celle qui vise à décomposer l'espace formé par les données réelles en deux sous-espaces orthogonaux : celui du '*signal*' et celui du '*bruit*'. Le sous-espace '*signal*' contient alors théoriquement toutes les informations relatives à l'énergie qui se propage à travers l'antenne alors que le sous-espace '*bruit*' contient toute l'énergie qu'il n'est pas possible d'expliquer par un processus de propagation d'onde plane à travers l'antenne. Le sous-espace '*bruit*' décrit donc également toute la partie non-cohérente du champ d'onde. La séparation en ces

deux sous-espaces est obtenue par diagonalisation de la matrice de covariance (si l'analyse est réalisée dans le domaine temporel) ou de la matrice spectrale (si elle est réalisée dans le domaine fréquentiel). Une fois la séparation faite, on est alors en mesure de travailler indifféremment sur chacun des deux sous-espaces et de caractériser soit le sous-espace '*signal*', soit le sous-espace qui lui est orthogonal, le sous-espace '*bruit*'.

Le filtrage par matrice spectrale appartient à cette classe de méthode (Mari, Glangeaud, Coppens, 1997) et vise à projeter le jeu de données initiales sur les différents vecteurs propres du sous-espace '*signal*' dans le but de séparer des phases multiples interférant simultanément en temps. Nous reviendrons sur cette méthode et sur sa capacité à séparer les ondes dans le cadre de notre étude au paragraphe 2.3.2.

Enfin, appartient également à cette classe de méthode celle développée par Schmidt (1979, 1986): la méthode *MUSIC* (MUltiple Signal Classification). Une fois la séparation réalisée, *MUSIC* ne se préoccupe que du sous-espace '*bruit*' et recherche les vecteurs d'ondes qui ont une projection minimum sur ce sous-espace ou encore les vecteurs qui sont perpendiculaires à ce sous-espace. La séparation entre le sous-espace '*signal*' et le sous-espace '*bruit*' est généralement basée sur la courbe de décroissance des valeurs propres de la matrice spectrale. Les vecteurs propres correspondant aux valeurs propres les plus énergétiques appartiennent au sous-espace '*signal*'. Les vecteurs propres restants appartiennent au sous-espace '*bruit*'. Théoriquement, cette décroissance permet d'estimer le nombre de phases qui se propagent simultanément dans la même fenêtre temporelle en comptant simplement le nombre de valeurs propres supérieures à celles caractéristiques du bruit. Plusieurs auteurs ont mis en avant la supériorité de *MUSIC* à décrire correctement des signaux à composantes multiples. En théorie, son pouvoir de séparation est supérieur à celui des méthodes classiques du type '*retard-sommation*' ou des méthodes haute-résolution du type '*Capon*'. De plus, *MUSIC* est plus robuste en présence de signaux à faible rapport signal sur bruit. (Goldstein et Archeluta, 1987).

#### **2.2.4. Discussion et Conclusions**

L'ensemble des méthodes basées sur les techniques de '*retard-sommation*' sont robustes dès lors que le signal analysé est principalement composé d'une seule phase dominante. Lorsque les antennes sont utilisées à des fins de détection automatique, avec le souci principal d'augmenter le rapport signal sur bruit et de détecter des événements de faibles magnitudes, ce sont souvent ces techniques qui sont utilisées. En effet, elles sont robustes lorsque le signal analysé est cohérent et qu'une seule phase domine : c'est souvent le cas dans les premières secondes des sismogrammes, lorsque les phases issues des interactions complexes entre le champ d'onde et le milieu de propagation ne sont pas encore dominantes dans le signal. En matière de détection, ce sont les trains d'ondes classiques *P* et *S* qui sont les plus faciles à identifier et les plus intéressantes puisque généralement, ce sont aussi ces trains d'ondes qui servent à localiser les événements sismiques. Dans cette thèse, ce ne

sont pas tant ces phases classiques qui nous intéressent mais justement toutes les phases secondaires présentes sur les sismogrammes. En effet, ce sont aussi celles qui sont porteuses d'informations relatives aux hétérogénéités présentes dans le milieu de propagation et qui nous renseignent sur la déformation du champ d'onde au cours de sa propagation, lorsqu'il rencontre ces hétérogénéités. Lorsque le milieu de propagation devient très complexe, les phénomènes de diffraction et de réfraction deviennent également très importants et le nombre de phases qui contribuent à la coda et qui se propagent simultanément à travers l'antenne d'observation peut également devenir important. Les méthodes classiques type '*retard-sommation*' sont alors insuffisantes à décrire correctement les signaux. L'objectif de cette thèse n'étant pas de mettre au point un outil de traitement automatique mais bien un outil d'analyse fin des signaux à grandes composantes ondulatoires, nous ne nous intéresserons donc pas aux méthodes classiques et nous leur préférons les méthodes qualifiées '*haute-résolution*'.

Les capacités des méthodes type '*Capon*' ont déjà largement fait leurs preuves à travers de multiples applications. Ces méthodes ne seront donc pas reconsidérées dans ce travail et nous attacherons à tester les limites des méthodes de décomposition en composantes orthogonales. Alors que les filtrages par matrice spectrale ont largement été utilisés dans le domaine de la géophysique pétrolière, à des fins de séparation d'ondes, les méthodes type *MUSIC* sont peut être aujourd'hui moins bien connues.

Les méthodes de décomposition en sous-espaces orthogonaux sont attrayantes parce qu'elles permettent à l'utilisateur d'avoir un contrôle sur le taux d'information qu'il désire introduire dans le sous-espace '*signal*'. De plus, il a été montré leur supériorité de résolution en termes de séparation lorsque plusieurs ondelettes interfèrent. Nous sommes alors tentés de mettre à profit ce type de méthode et d'évaluer dans quelles mesures elles permettent de répondre à nos attentes. C'est l'objectif des prochains paragraphes.

*Note : Les expressions mathématiques des différents estimateurs fréquence-nombre d'onde décrits ci-dessus figurent en ANNEXE1.*

### 2.3. Décomposition Temps-Fréquence-Nombre d'onde (TFK)

Nous avons expliqué que lorsque le milieu de propagation devenait très complexe, la coda des sismogrammes régionaux est constituée de la superposition de nombreuses phases sismiques qui sont intéressantes à étudier parce qu'elles contiennent toute l'histoire du champ d'onde, depuis la source jusqu'à son point d'enregistrement. La compréhension des phénomènes complexes mis en jeu lors de la propagation du champ d'onde dans la croûte terrestre passe par une identification complète des différentes phases sismiques présentes sur les sismogrammes. Nous nous intéresserons dans ce manuscrit uniquement aux phases déterministes, c'est-à-dire celles que l'on sera capable d'expliquer

par une propagation cohérente à l'échelle de l'antenne d'observation. Une phase sera complètement décrite et identifiée lorsque nous lui aurons attribué un temps d'arrivée, un contenu fréquentiel, un vecteur nombre d'onde (ou encore une direction et une vitesse apparente de propagation) ainsi qu'une énergie ou un poids par rapport à l'énergie globale contenue dans le sismogramme. Nous avons déjà donné des pistes permettant de retrouver la plupart de ces attributs dans les sections précédentes. En effet, une décomposition temps-fréquence permet de décomposer le sismogramme dans l'espace des fréquences temporelles et de connaître l'évolution de son contenu fréquentiel. De plus, il permet d'accéder à la répartition énergétique du sismogramme. D'autre part, nous avons également vu que si un champ d'onde était enregistré en différents points de l'espace, une décomposition en nombre d'onde permettait de connaître sa direction ainsi que sa vitesse apparente de propagation. Une combinaison de ces différentes décompositions permet d'accéder à une décomposition temps-fréquence-nombre d'onde des sismogrammes. Les différents attributs énoncés ci-dessus sont alors connus et une interprétation peut être donnée quant aux hétérogénéités qui ont généré la propagation de chacune des phases secondaires observées. Ceci permettra de répondre à un de nos principaux objectifs: trouver les interactions entre le champ d'onde incident émis lors d'un séisme et les différentes hétérogénéités présentes dans le milieu de propagation. La complexité du sismogramme étant directement proportionnelle à celle du milieu de propagation, lorsque celui-ci devient très hétérogène, les phases secondaires se multiplient et nécessitent l'utilisation de méthodes de décomposition haute-résolution. En effet, on assiste alors à la propagation simultanée des phases sismiques à travers l'antenne, avec des contenus fréquentiels différents ou non, avec des vecteurs nombres d'onde différents ou non. Un des résultats de cette thèse est la mise au point d'une méthode de décomposition temps-fréquence-nombre d'onde ayant un pouvoir de séparation supérieur aux méthodes classiquement utilisées, permettant d'aller plus loin dans l'identification et donc dans la caractérisation des différentes phases sismiques. La méthodologie développée et la stratégie de traitement de nos sismogrammes régionaux est entièrement explicitée ci-dessous. Les différentes étapes du traitement ainsi que les techniques utilisées à chaque étape seront données. L'algorithme de décomposition des sismogrammes selon des lignes de crêtes que nous utiliserons pour sélectionner les zones temps-fréquence qui portent l'essentiel de l'information contenue dans le signal sera présenté. Le long de chacune des lignes de crêtes, l'évolution des paramètres de propagation sera calculée grâce à l'enregistrement multi-composantes du champ d'onde. Pour ce dernier point, on s'intéressera alors principalement aux méthodes qui visent à décomposer en composantes orthogonales l'espace formé par l'ensemble des données enregistrées. Nous verrons notamment ce que peuvent nous apporter deux des techniques basées sur ces décompositions, à savoir le filtrage par la matrice spectrale dans un premier temps et la décomposition en nombre d'onde utilisant l'algorithme *MUSIC* dans un second temps. Ces deux dernières techniques seront validées ou réfutées par des applications sur des exemples synthétiques et réels.

Dans un souci de clarté, nous allons détailler pas à pas les différentes étapes successives du traitement. Ces étapes sont:

- La sélection des zones temporelles les plus énergétiques contenues dans le sismogramme ainsi que l'estimation du contenu fréquentiel correspondant à chacune de ces zones. L'algorithme de recherche des lignes de crêtes sera appliqué à chacun des signaux enregistrés par la nappe de capteurs.
- Le calcul d'une décomposition temps-fréquence globale intégrant la notion de cohérence du champ d'onde à l'échelle de l'antenne.
- L'estimation des paramètres de propagation pour chacune des zones précédemment sélectionnées.

### 2.3.1. La sélection des zones temporelles: Décomposition en lignes de crêtes

#### *L'algorithme*

Le Scalogramme utilise le module de la transformée en ondelettes (TO), et donne une mesure de la densité d'énergie du signal en fonction du temps et de la fréquence. L'algorithme de décomposition du signal en lignes de crêtes (Delprat et al., 1992 ; Mallat, 1999) utilise une information supplémentaire puisqu'il prend également en compte l'information portée par la phase de la TO. Les coefficients de la TO sont définis par:

$$RTF^{T0}(t, \nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} z(\tau) h(\tau - t) \exp[2i\pi(\Phi_z(\tau) - \nu\tau)] d\tau$$

Éq. 2-6

avec  $z(t)$ , le signal analytique de  $s(t)$  et  $\Phi_z(t)$ , sa phase. On suppose que  $h(t)$  est une fonction réelle. La contribution essentielle à cette intégrale oscillante provient des seuls voisinages des points 'stationnaires' pour lesquels la dérivée de la phase du terme  $\llbracket z(\tau) h(\tau - t) \exp[2i\pi(\Phi_z(\tau) - \nu\tau)] \rrbracket$  s'annule. Par contre, lorsque la phase oscille très vite, la contribution de ce terme à l'intégrale définie Éq. 2-6 est quasi-nulle. Autour de la fréquence  $\nu = \nu_0$ , l'ensemble des points qui vérifient le principe de la phase stationnaire est donc défini par:

$$\frac{d\Phi_{RTF^{T0}}}{dt} = \frac{d(\Phi_z(t) - \nu_0 t)}{dt} = 0 \Leftrightarrow \nu_i(t) = \nu_0$$

Éq. 2-7

où  $\nu_i(t)$  est la fréquence instantanée du signal. Les lignes de crêtes sont constituées des zones du plan temps-fréquence « où la fréquence naturelle de l'ondelette analysante coïncide avec la fréquence ou une des fréquences locales du signal ». Une hypothèse de stationnarité à court-terme selon laquelle

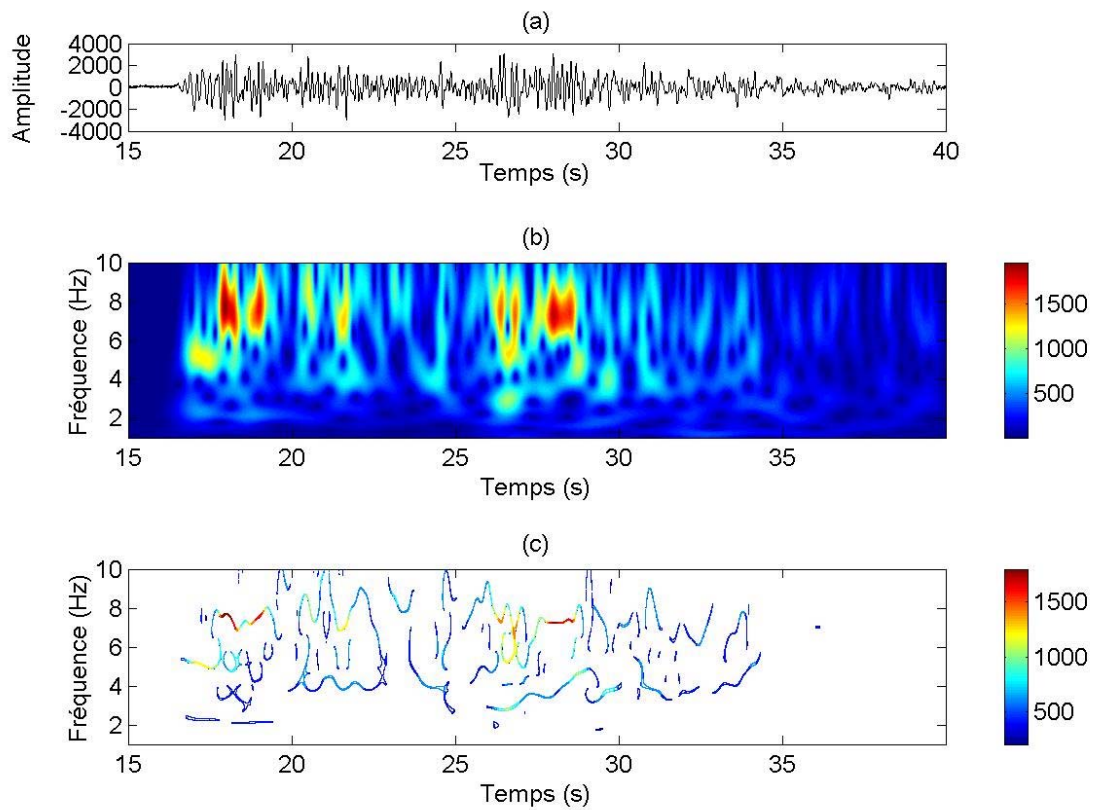
$|z(t)|$  et  $d\Phi_z(t)/dt$  présentent des variations faibles sur l'ensemble de la durée d'analyse définie par la largeur de  $h(t)$  doit être vérifiée, exactement comme pour la transformée en ondelettes.

Les différentes décompositions temps-fréquence citées dans la section 2.1.2 de ce chapitre admettent toutes une représentation à deux dimensions continue de l'énergie contenue dans le signal, selon les variables de description que sont le temps et la fréquence. La recherche des lignes de crêtes rend cette représentation discrète, puisque autour de chaque temps d'analyse, seul un certain nombre de fréquences est retenu. A un instant donné, l'information calculée n'est pas uniquement l'énergie associée à chaque fréquence mais également la stabilité locale de chacune de ces fréquences présentes dans le signal. Seules les fréquences suffisamment stables seront retenues ainsi que l'énergie qui leurs est associées.

### *Mise en œuvre*

Pratiquement, on déploie la transformée en ondelettes dans le plan temps-fréquence et on calcule la fréquence instantanée du signal en fonction du temps, dans chaque bande de fréquence. Un échantillon temporel est retenu si sa fréquence instantanée est égale à la fréquence centrale de la bande passante du filtre utilisé.

Grâce à cet algorithme, on réduit fortement l'étalement temporel et fréquentiel des différentes phases, généralement présent dans l'ensemble des transformées utilisant une fenêtre d'observation à court-terme. L'information est condensée de manière à ne retenir que les zones temps-fréquence les plus stables et les plus énergétiques. Néanmoins, l'algorithme de recherche des lignes de crêtes n'améliore en rien le pouvoir de séparation des différentes phases dans le plan temps-fréquence, qui est entièrement gouverné par les caractéristiques de la fenêtre d'observation à court-terme. Les lignes de crêtes ont été calculées pour un des signaux réels enregistrés pendant l'expérience d'Annot (voir chapitre IV). La comparaison avec le Scalogramme du même signal montre clairement l'apport de la décomposition en lignes de crêtes en terme de localisation des zones prépondérantes d'énergie. Seules les lignes de crêtes dont l'énergie est supérieure à un certain seuil ont été retenues de manière à éliminer celles dont l'énergie est trop faible ou celles qui sont le résultat d'artefact introduit par le calcul. Ce seuil sera fixé par rapport à l'énergie maximum contenue dans le signal. Dans ce cas précis, nous avons fixé le seuil au dessus duquel les lignes de crêtes seront retenues à 10% du maximum de la décomposition.

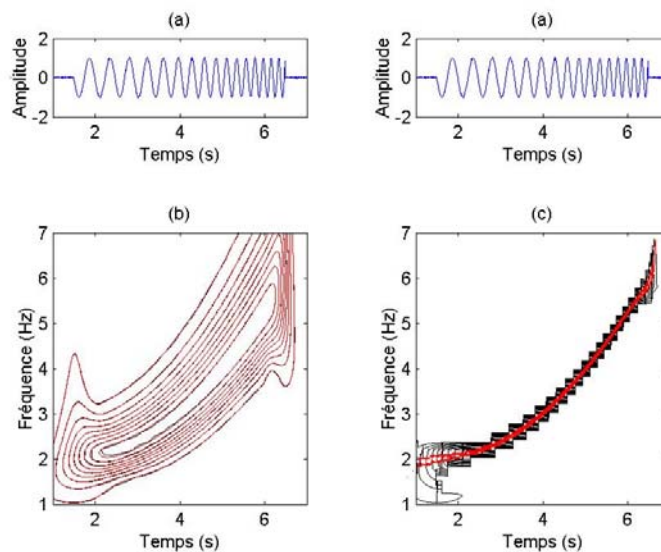


**Fig. 2-6 : (a) Un des signaux enregistrés par l’antenne ‘*Méailles*’ pendant la campagne d’*Annot*. (b) Scalogramme de ce même signal. (c) Décomposition en lignes de crêtes extraites du Scalogramme.**

Pour notre traitement, la recherche des lignes de crêtes est particulièrement bien adaptée puisqu’elle concentre l’information du plan temps-fréquence et réduit donc considérablement les temps de traitement. En effet, la décomposition visant à retrouver les paramètres de propagation des différentes phases ne sera réalisée que le long des lignes de crêtes et non plus pour toutes les cellules *(temps, fréquence)* les plus énergétiques d’une décomposition temps-fréquence classique. Cet algorithme nous permet donc non seulement de déterminer, à chaque instant le nombre de composantes ondulatoires qui se propagent simultanément à travers l’antenne mais constitue également un moyen de sélection des cellules qu’il est intéressant de décomposer dans l’espace des nombres d’onde. En plus d’être localisé sur une ligne de crêtes suffisamment énergétique, les cellules temps-fréquence finalement sélectionnées pour la suite du traitement devront également présenter une cohérence forte à l’échelle de l’antenne. Ce point sera précisé dans la section ‘*Décomposition Temps-Fréquence globale*’ de ce chapitre.

### Localisation des lignes de crêtes

La finesse de localisation de l'énergie dans le plan temps-fréquence lors de la recherche des lignes de crêtes dépend directement du pas en fréquence avec lequel on décale la fenêtre d'observation à court-terme entre chaque filtrage successif. En ce qui concerne le calcul du Spectrogramme ou du Scalogramme, le pas utilisé en fréquence lisse simplement plus ou moins les zones d'énergies importantes mais globalement, en terme de localisation de l'énergie, tout reste inchangé. Par contre, pour ce qui est des lignes de crêtes, le pas utilisé en fréquence est important dans la précision de l'estimation des fréquences instantanées. Plus ce pas sera petit et plus la localisation sera fine dans le plan temps-fréquence. Ceci est illustré sur la Fig. 2-7 où on a calculé le Scalogramme et la ligne de crête associée à une modulation quadratique de fréquence pour un décalage en fréquence égale à 0.2 Hz (en noir) et 0.05 Hz (en rouge). Les décompositions temps-fréquence correspondantes sont représentées Fig. 2-7-(b) et Fig. 2-7-(c), respectivement en rouge et en noir. Le Scalogramme est indifférent à la variation du pas en fréquence alors que la localisation de la ligne de crête s'améliore lorsqu'on augmente la redondance de l'information dans la décomposition. Cette augmentation est surtout notable pour les basses fréquences.



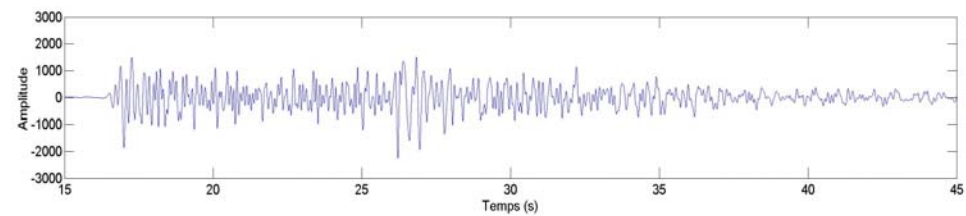
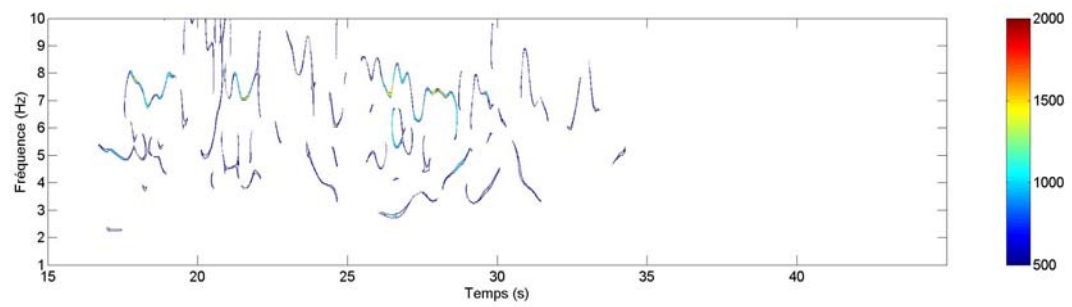
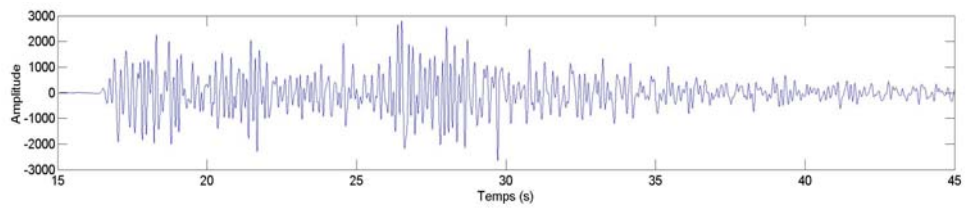
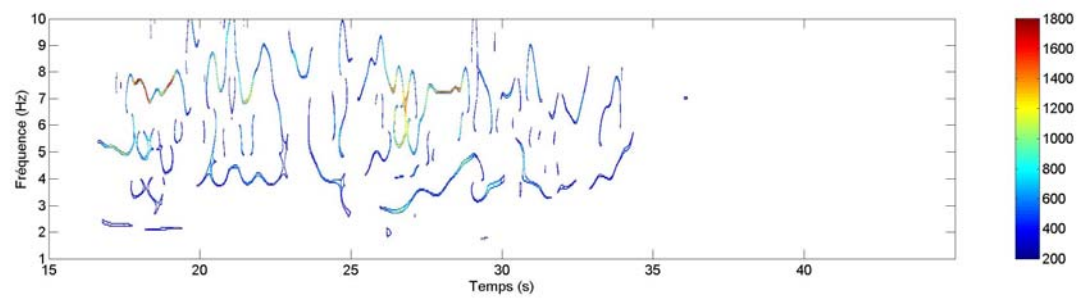
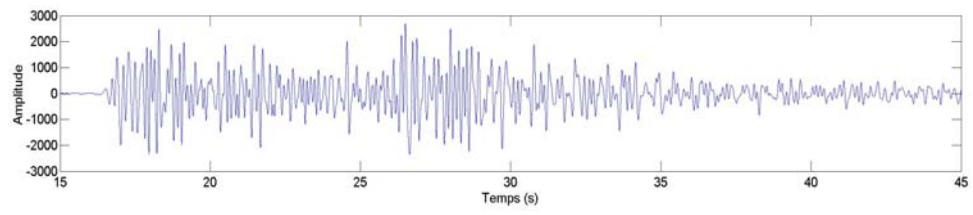
**Fig. 2-7 :** Le signal étudié (a) est une modulation quadratique de la fréquence entre 2 et 6Hz. (b) Le Scalogramme normalisé et (c) la ligne de crête extraite du Scalogramme ont été calculés pour deux valeurs différentes du pas en fréquence -  $\Delta\nu = 0.2\text{ Hz}$  , (courbe noire) et  $\Delta\nu = 0.05\text{ Hz}$  , (courbe rouge).

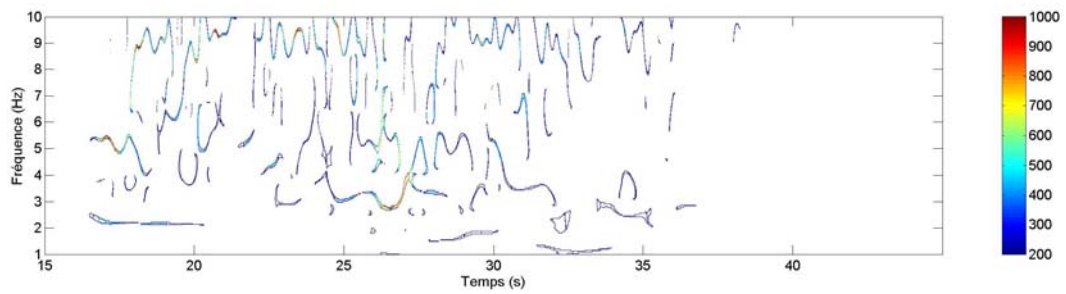
On choisira donc systématiquement un pas en fréquence aussi petit que nous l'autorise la puissance de calcul disponible.



### ***Décomposition Temps-Fréquence globale***

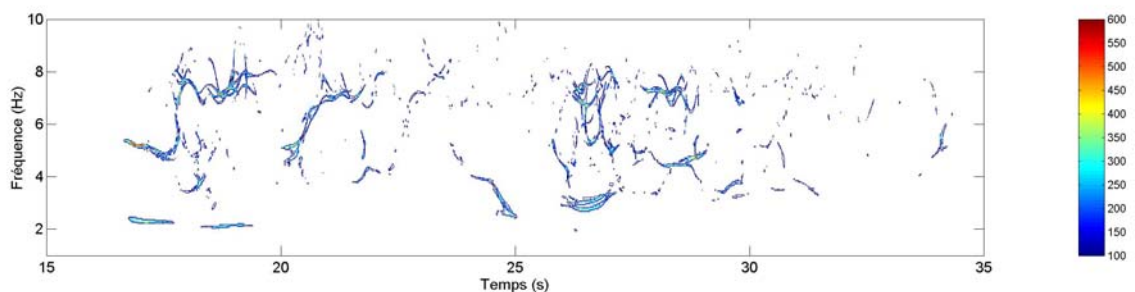
Dès lors que l'on accède à un enregistrement multi-composantes du champ d'onde, on accède également à une forte redondance de l'information puisqu'on l'enregistre en plusieurs points de l'espace. La recherche des lignes de crêtes réalisée séparément sur chacun des sismogrammes enregistrés par l'antenne présente de fortes similarités mais également des caractéristiques qui sont propres à chacun d'eux. D'abord, le champ d'onde peut présenter une modification du contenu fréquentiel au cours de sa propagation, due aux phénomènes d'atténuation et de dispersion dans la croûte terrestre. Lorsque nous appliquerons cette décomposition aux données enregistrées lors de l'expérience d'*Annot*, on pourra supposer le champ d'onde stationnaire car l'antenne d'observation est petite devant la longueur d'onde des signaux. Ensuite, on peut avoir une modification du champ d'onde propre à chaque station d'enregistrement et due à des effets très locaux au site d'enregistrement. Enfin, lorsque plusieurs phases ayant des fréquences dominantes proches se propagent simultanément à travers l'antenne, la géométrie de leurs interférences est différente d'un capteur à un autre, ce qui peut mener à des contenus fréquentiels résultant sensiblement variable. Un exemple des variations observées entre les différentes décompositions temps-fréquence à l'échelle de l'antenne est montré sur les Fig. 2-8 où on a recherché les lignes de crêtes associées aux signaux enregistrés par trois capteurs de l'antenne pour un événement enregistré par l'antenne '*Méailles*' pendant la campagne d'*Annot*. Les capteurs 6 et 9 sont respectivement situés à une distance de 20 et 105 mètres du capteur 5. Malgré les faibles distances de propagation, de fortes variations peuvent exister entre les différentes décompositions temps-fréquence calculées. Ces variations diminuent avec la distance qui sépare les différents sites d'enregistrement.





**Fig. 2-8 : Les signaux représentés ont été enregistrés pendant la campagne d'Annot, par les capteurs ME5, ME6 et ME9 de l'antenne 'Méailles', pour l'événement du 13 mai 1998, 21h04mn30s. Les décompositions en lignes de crêtes calculées pour chaque signal, entre 1 et 10 Hz, ont été représentées.**

Il faut donc se méfier de la prise en compte d'une décomposition temps-fréquence unique et ne pas s'en servir comme seul moyen de sélection des zones significatives à décomposer dans le domaine des nombres d'ondes. L'information enregistrée par chacun des capteurs doit être prise en compte et on se doit de se donner les moyens d'extraire celle commune à tous les capteurs. Une recherche des lignes de crêtes sera donc faite sur le signal enregistré par chaque capteur de l'antenne et dans un premier temps, une décomposition globale sera construite en moyennant simplement les différentes décompositions. On fait alors l'hypothèse que si une phase sismique se propage de manière cohérente à travers l'antenne, elle génère une ligne de crêtes qui doit admettre la même localisation sur chacune des décompositions, à un décalage temporel près, égal au temps de propagation du champ d'onde entre les différents capteurs. Si tel est le cas, une moyenne des différentes décompositions doit renforcer les lignes de crêtes communes et atténuer toutes celles qui possèdent des localisations non cohérentes entre les différents capteurs. Le résultat de la décomposition globale en lignes de crêtes est représenté sur la Fig. 2-9, pour l'événement du 13 mai 1998 étudié précédemment. Pour le calcul de cette décomposition, les décompositions de l'ensemble des signaux enregistrés par l'antenne 'Méailles' ont été utilisées.



**Fig. 2-9 : Décomposition globale en lignes de crêtes, pour l'événement du 13 mai 1998, 21h04mn30s. Tous les capteurs de l'antenne ont été pris en compte pour le calcul de cette décomposition.**

On observe que l'énergie localisée dans les zones temps-fréquence communes aux décompositions temps-fréquence des différents signaux sont présentes sur cette décomposition globale. On observe

également que les lignes de crêtes présentent une certaine dispersion, résultant des déformations du champ d'onde au cours de sa propagation à travers l'antenne, comme il a été expliqué au début de ce paragraphe. Ces déformations induisent également une diminution de l'énergie moyenne contenue dans le diagramme temps-fréquence. Tout se passe alors comme si cette énergie avait été pondérée par la cohérence locale qui existe entre les différents signaux enregistrés par l'antenne.

Cette façon de faire est bien adaptée aux antennes de faible ouverture comme celles utilisées à *Annot*. Lorsque les distances de propagation entre les différents capteurs de l'antenne deviennent plus grandes, un pré-traitement visant à corriger la localisation de la ligne de crête du temps de propagation inter-capteurs doit être mis en place.

L'étape précédente permet de sélectionner les zones du plan temps-fréquence les plus énergétiques et les plus cohérentes. Une dernière étape est ensuite réalisée le long de l'ensemble des lignes de crêtes obtenues après sommation, à savoir un calcul de cohérence locale. Cette dernière étape permettra de plus de ne sélectionner que les zones du plan temps-fréquence pour lesquelles la cohérence locale est suffisamment forte. Cette cohérence s'exprime par :

$$COH(t, \nu) = \sum_{i=1}^{N_{trace}} \sum_{j=i+1}^{N_{trace}} \frac{|\hat{SM}_{ij}(t, \nu)|}{\sqrt{\hat{SM}_{ii}(t, \nu) \cdot \hat{SM}_{jj}(t, \nu)}}$$

Éq. 2-8

avec  $\hat{SM}_{ij}(t, \nu)$ , l'interspectre estimé ( $\hat{\phantom{x}}$  veut dire que les interspectes sont des quantités estimées, obtenues après l'application d'un ou plusieurs types de moyenne, voir paragraphe '**Estimation de la matrice spectrale**'), pour la fréquence  $\nu$  entre les signaux enregistrés par les capteurs  $i$  et  $j$ , prélevés par une fenêtre d'observation centrée sur  $t$  (voir paragraphe suivant pour la définition de l'interspectre et les différentes façons de l'estimer). Le calcul de la cohérence sera directement intégré à la décomposition en nombres d'onde. La largeur de la fenêtre temporelle d'analyse sera alors adaptée à la fréquence d'analyse à laquelle nous nous intéressons. Ce dernier calcul permet de certifier que les zones temps-fréquence que nous cherchons à caractériser présentent une cohérence forte à l'échelle de l'antenne, hypothèse de base de toutes analyses en antenne.

## Conclusions

Nous avons estimé en fonction du temps, le contenu fréquentiel des différentes phases présentes dans le sismogramme. L'algorithme des lignes de crêtes été utilisé. Cette première décomposition permet déjà de détecter la propagation de phases simultanées à travers l'antenne, dont les contenus fréquentiels sont différents, et donc aussi de les séparer. L'estimation de la fréquence de ces différentes phases sera ensuite nécessaire au calcul de leurs vitesses apparentes de propagation à travers l'antenne. Cette première étape du traitement permettra également de ne retenir que les cellules

*(temps, fréquence)* qui nous semblent être porteuses de l'essentiel de l'information, à savoir les zones les plus énergétiques et les plus cohérentes à l'échelle de l'antenne. Ces zones seront ensuite décomposées dans le domaine des nombres d'onde dans le but de les caractériser en termes de paramètres de propagation. C'est l'objectif du paragraphe 2.3.2.3 de ce chapitre.

### 2.3.2. Décomposition en composantes orthogonales

Les points méthodologiques suivants visent à montrer comment nous avons utilisé l'information apportée par l'enregistrement des signaux sismiques *via* un antenne, dans le cadre de cette thèse. La matrice spectrale, qui contient toutes les informations relatives aux interactions entre les différents signaux enregistrés par l'antenne, et sa décomposition en composantes orthogonales sont les points de départ des deux méthodes décrites ci-dessous. Le filtrage par la matrice spectrale sera d'abord abordé. Il est réalisé lorsque l'on cherche à extraire une onde dominante dans une fenêtre d'analyse donnée. Cette extraction permet alors de mettre en évidence, des arrivées secondaires d'amplitudes généralement plus faibles et cachées par l'onde dominante. Nous verrons dans quel cas le filtrage par matrice spectrale est optimal et testerons son pouvoir de séparation dans le cas des antennes de faible ouverture, comme celle déployée à *Annot*. Dans un deuxième temps, nous nous intéresserons aux décompositions fréquence-nombre d'onde, et plus particulièrement à l'algorithme *MUSIC* que nous utiliserons finalement pour nos traitements. Ses difficultés de mise en œuvre ainsi que ses limites de résolution seront précisées. Dans chacun des cas, le point de départ est la matrice spectrale. Nous allons donc dans un premier temps définir comment cette matrice peut être estimée à partir des données initiales.

#### *Estimation de la matrice spectrale*

Soit  $s(t, \vec{r})$  l'ensemble des signaux enregistrés par l'antenne de capteurs et  $S(v, \vec{r})$  leurs transformées de Fourier respectives, on peut alors calculer les différents termes de la matrice spectrale  $SM_{i,j}(v_0)$  définis par :

$$SM_{i,j}(v_0) = S(v_0, \vec{r}_i) \cdot S^*(v_0, \vec{r}_j)$$

Éq. 2-9

où  $*$  désigne l'opération transposée conjuguée. La matrice spectrale est définie pour chaque fréquence échantillonnée  $v_0$  et il y a donc autant de matrices que d'échantillons en fréquence. Pour une fréquence donnée, cette matrice est de dimension  $(N_{trace} * N_{trace})$  où  $N_{trace}$  est le nombre de capteurs de l'antenne. Elle contient tous les autospectres et interspectres et définit donc également les interactions entre toutes les traces de l'antenne, ceci à chaque fréquence. Pour que la matrice spectrale soit correctement estimée, il est nécessaire de lui appliquer un ou plusieurs opérateurs de moyennes, sans quoi son rang est égal à 1. Ces opérateurs sont détaillés ci-dessous et ont tous le même objectif: réduire les termes d'interférences de la matrice spectrale dus aux interactions qui existent entre les différentes phases incohérentes d'une trace à une autre ou entre les différentes phases et le bruit

contenus dans les signaux, tout en renforçant les termes dus aux interactions des phases cohérentes d'une trace à une autre, dans la même fenêtre d'analyse.

Les **moyennes de réalisations** sont possibles lorsque la source sismique est connue et reproductible un certain nombre de fois (comme c'est par exemple souvent le cas en sismique). L'hypothèse de base est que le signal '*utile*' ne varie pas d'une réalisation à une autre et est augmenté par la sommation des différentes traces enregistrées d'une réalisation à une autre. Le bruit s'annule parce qu'il présente des fluctuations incohérentes. Si cette hypothèse est vérifiée, on voit clairement ressortir du bruit de fond, la partie déterministe du signal, constituée de l'ensemble des ondelettes directes, réfléchies et réfractées à chacun des interfaces qui caractérisent le milieu de propagation. En sismologie, sauf cas très particulier, il n'est pas possible d'utiliser les moyennes de réalisations.

Les **moyennes spatiales** constituent un autre type de lissage et consistent à effectuer directement des moyennes sur les différents termes de la matrice spectrale, fréquence par fréquence. Le principe est de moyenner les termes  $SM_{ij}(v_0)$  et  $SM_{kl}(v_0)$  avec  $1 \leq i, j, k, l \leq N_{trace}$ , à condition que l'hypothèse

$$\vec{r}_{ij} \approx \vec{r}_{kl}$$

Éq. 2-10

soit vérifiée. Pour appliquer ce type d'opérateur, il est cependant nécessaire de vérifier que l'ensemble des capteurs reposent sur le même substratum. Initialement formulé par Shan et al. (1985) pour l'application à des antennes linéaires pour lesquelles une condition d'équidistance doit être vérifiée entre les différents capteurs, le lissage spatial a été développé de manière à pouvoir être également appliqué à des antennes bidimensionnelles. Cependant, de fortes contraintes sur la géométrie de l'antenne subsistent puisque l'on doit être en mesure de trouver des capteurs vérifiant les conditions données par l'Éq. 2-10. Les antennes ayant enregistré les différentes données que nous allons étudier ne sont pas adaptées pour ce type de lissage et nous ne serons donc pas en mesure de l'appliquer.

Les **moyennes en fréquence** sont indépendantes de la géométrie de l'antenne et sont généralement toujours applicables. Elles consistent à lisser les petites fluctuations des interspectres tout en laissant leurs tendances inchangées. Ce lissage peut être directement réalisé sur les interspectres, en opérant dans le domaine fréquentiel ou sur les intercorrélations en opérant dans le domaine temporel. Ce type de filtrage sera détaillé ci-dessous.

**Conclusions** chacun des processus d'estimation de la matrice spectrale définit ci-dessus opère dans des espaces différents. Le résultat de l'estimation s'améliore lorsque le nombre de moyennes effectuées est grand, l'idéal étant de coupler chacun des processus. Compte tenu du type d'événements auquel nous nous intéressons et de la géométrie des antennes avec lesquelles ces événements ont été enregistrés, nous ne pourrions utiliser ni les moyennes de réalisations, ni les moyennes spatiales. Nous estimerons alors la matrice spectrale au moyen d'un lissage en fréquence.

## *Le filtrage par matrice spectrale*

Un des points étudiés pendant cette thèse a été de comprendre dans quelles mesures un filtrage par matrice spectrale est adapté ou non à la séparation d'ondes, lorsque les signaux à décomposer ont été enregistrés par des antennes bidimensionnelles, de faible ouverture.

L'idée est de se servir du filtrage par matrice spectrale pour éliminer progressivement les ondes dominantes, de manière à pouvoir analyser les traces résiduelles et ainsi mettre en évidence des phases secondaires, d'amplitudes bien inférieures à celle de l'onde dominante et donc généralement masquées. Le filtrage par matrice spectrale a largement montré son efficacité à séparer les ondes dans le cadre de l'interprétation de sections sismiques (Glangaud et Mari, 1993).

La mise en œuvre d'un tel filtrage est réalisée en plusieurs étapes:

- Sélection de la fenêtre temporelle à analyser

Le filtrage ne doit pas être réalisé directement sur des fenêtres temporelles de longue durée, ceci pour éviter que le nombre de composantes présentes dans la fenêtre d'observation ne soit trop élevé.

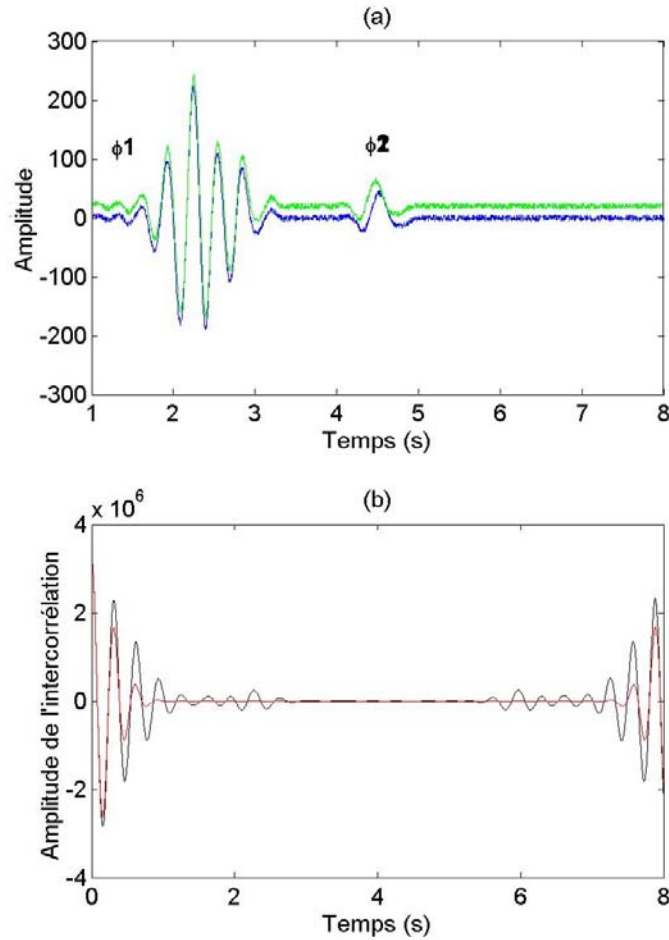
- Calcul de la matrice spectrale et estimation par lissage en fréquence

La matrice est calculée par l'Éq. 2-9 et un opérateur de lissage en fréquence est appliqué. Avant ce lissage, il est nécessaire d'effectuer un pré-alignement des différentes traces par rapport à l'ondelette dominante que l'on souhaite extraire par le filtrage. Sans pré-alignement, on introduit un biais sur l'estimation de l'ondelette dominante et ce biais augmente d'autant plus que le pré-alignement a été effectué grossièrement. Le lissage en fréquence des interspectres peut être réalisé soit dans le domaine fréquentiel en moyennant directement les interspectres, soit dans le domaine temporel en pondérant les fonctions d'intercorrélations. Nous choisirons systématiquement cette dernière option, car elle permet d'avoir une meilleure compréhension des paramètres de lissage utilisés (durée de la fenêtre de lissage). De plus, sa mise en œuvre est plus rapide.

Considérons un cas simple où deux ondelettes se propagent de façon successive à travers une antenne dont la configuration géométrique est équivalente à celle déployées à *Annot*. Nous appellerons  $\phi_1$  la première phase et  $\phi_2$  la deuxième phase. Sur la figure Fig. 2-10-(a), on a représenté, en bleu et en vert, les traces des capteurs 1 et 2 de l'antenne ayant enregistrés ces deux phases. Ces traces ont été recalées par rapport au temps d'arrivée de la phase  $\phi_1$ . Nous avons calculé la fonction d'intercorrélation entre ces 2 traces Fig. 2-10-(b). Cette fonction est caractérisée par un maximum



autour de  $t = 0s$ , dû aux interactions de  $\phi_1$  entre les traces 1 et 2 et de  $\phi_2$  entre les traces 1 et 2. Autour du temps  $t = 2.2s$ , un second maximum apparaît sur la fonction d'intercorrélation: il provient des interactions croisées entre  $\phi_1$  de la trace 1 et  $\phi_2$  de la trace 2 ainsi que  $\phi_1$  de la trace 2 et  $\phi_2$  de la trace 1. Ces dernières interactions viennent masquer l'information 'utile' contenue dans la matrice spectrale puisqu'elles ne sont pas liées à une propagation réelle d'une phase à travers l'antenne. La moyenne en fréquence a pour objectif d'atténuer ces interactions et consiste alors à appliquer une fonction de pondération aux fonctions d'intercorrélation de manière à rendre négligeable les termes secondaires qui sont localisés loin du temps  $t = 0s$ . Elle atténue donc toutes les ondes qui ont une incidence non-nulle. Sur la figure Fig. 2-10-(b), la courbe rouge représente la fonction d'intercorrélation après multiplication par une fenêtre de *Hanning* d'ordre 4, centré sur  $0s$ . Le pré-alignement de l'onde dominante a pour effet de ramener les maximums des fonctions d'intercorrélation proche du temps  $t = 0s$  de manière à ne pas introduire de biais sur l'estimation de l'ondelette dominante. Ce pré-traitement devient d'autant plus nécessaire que le nombre de composantes ondulatoires présentes dans la fenêtre d'observation est grand et que par conséquent, le lissage appliqué est fort. Ce pré-traitement est également important lorsque les distances qui séparent les différents capteurs sont grandes.



**Fig. 2-10 : (a) Les deux traces sont constituées de la propagation successive de deux ondelettes,  $\phi_1$  et  $\phi_2$ . (b-noir) fonction d'intercorrélation entre les deux traces représentées en (a). (b-rouge) fonction d'intercorrélation pondérée par une fenêtre de *Hanning* d'ordre 4.**

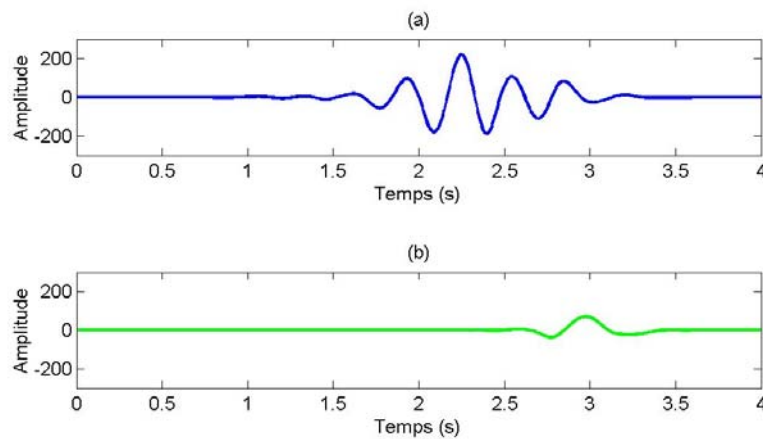
- Décomposition en composantes orthogonales de la matrice spectrale et projections des signaux initiaux sur le premier vecteur propre

Par décomposition en composantes orthogonales, on redistribue l'information contenue dans l'espace des données en un sous-espace '*signal*' et un sous-espace '*bruit*'. La répartition des différentes valeurs propres de la matrice spectrale permet alors en théorie, d'attribuer les différents vecteurs propres à chacun des deux sous-espaces. Ce point sera abordé plus en détail ultérieurement. Toute l'information relative à l'ondelette dominante mise à plat est alors projetée sur le premier vecteur propre. La section résiduelle, c'est à dire la somme des projections sur les vecteurs propres restants peut ensuite être analysée de façon plus fine et d'éventuelles phases secondaires être mises en évidence.

Nous avons étudié différents cas de figures pour lesquels le filtrage par matrice spectrale est plus ou moins bien adapté à la séparation d'onde. Les différents exemples ont été simulés sur une antenne sismologique du même type que celle qui a été utilisée à Annot (voir chapitre I et IV).

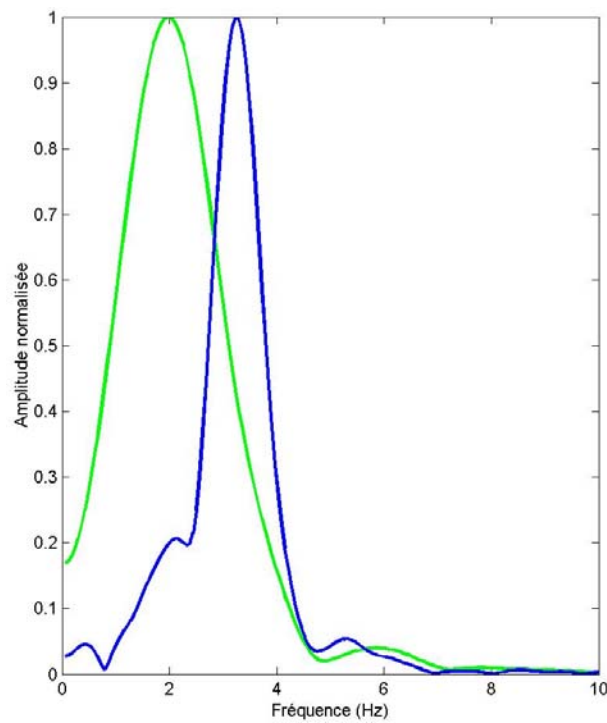
- deux ondelettes différentes se propagent simultanément à travers l'antenne mais les paramètres de propagation sont très différents

Pour générer nos signaux synthétiques, nous avons utilisé deux ondelettes extraites des signaux réels enregistrés pendant la campagne d'Annot. Ces deux ondelettes sont représentées sur la Fig. 2-11- (a) et (b).



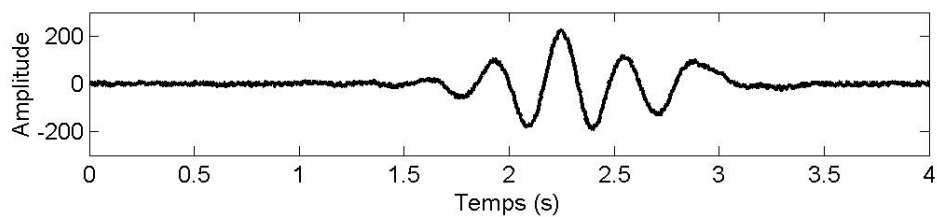
**Fig. 2-11 : (a) et (b) - Les deux ondelettes utilisées pour la construction des signaux synthétiques.**

Ces deux ondelettes admettent des contenus fréquentiels différents. Les spectres normalisés, relatifs à chacune des ondelettes sont représentés sur la Fig. 2-12 et montrent que le contenu fréquentiel des deux ondelettes se situe entre 1 et 4Hz. Le contenu fréquentiel de la première ondelette est centré sur 3.6Hz et celui de la deuxième ondelette sur 2Hz.



**Fig. 2-12 : Spectres normalisés de chacune des ondelettes présentées sur la Fig. 2-11.**

Nous avons donc, dans ce premier cas, simulé la propagation de chacune des ondelettes à travers l'antenne sismologique. Nous avons considéré que la première ondelette se propage avec une vitesse apparente infinie, de telle manière à ce que les décalages temporels relatifs à cette ondelette, entre les différents capteurs, soient nuls. La deuxième ondelette se propage, quant à elle, avec des paramètres de propagation qui sont  $(N90^\circ, 200m/s)$ . Cette vitesse de propagation est très faible par rapport aux vitesses de propagation réelles, classiquement rencontrées en sismologie, mais cet exemple n'est que démonstratif. Les signaux résultants sont obtenus en sommant les deux ondelettes propagées à travers l'antenne, et en rajoutant du bruit blanc dont l'amplitude est en moyenne égale à 5% de l'amplitude maximale du signal somme construit. La Fig. 2-13 montre le signal synthétique ainsi obtenu sur un des capteurs de l'antenne.

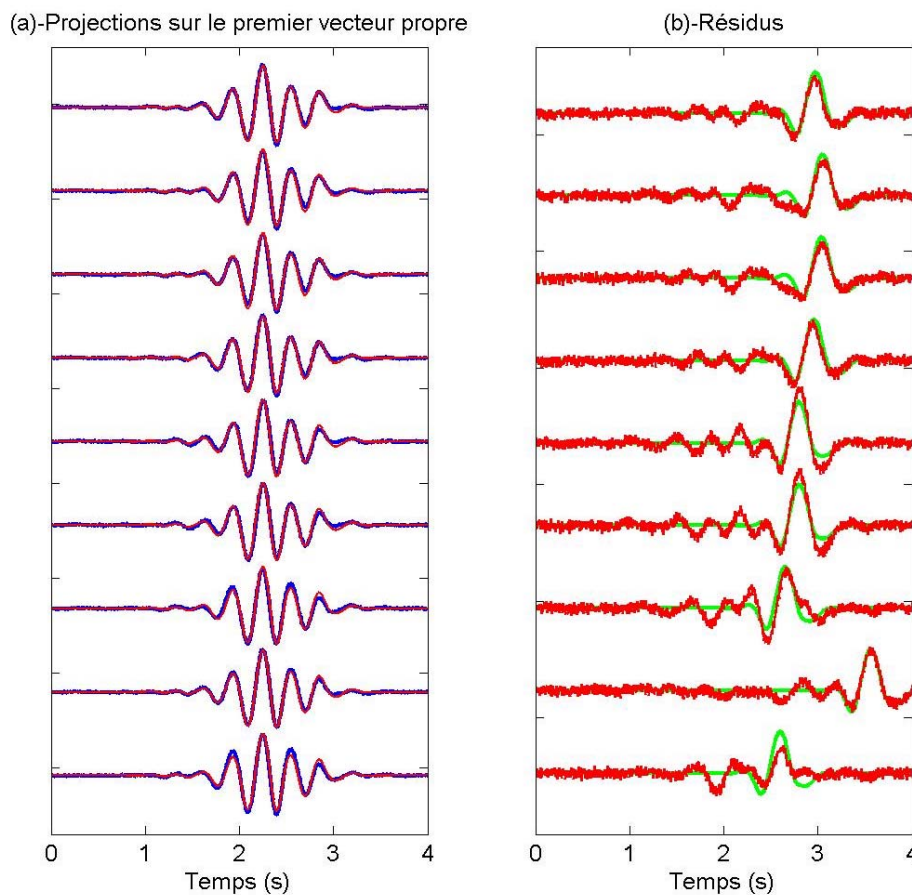


**Fig. 2-13 : Signal synthétique généré sur un des capteurs de l'antenne.**

Puis, nous avons effectué un filtrage par matrice spectrale des signaux synthétiques, dans le but de mettre en évidence la présence des deux ondes.

La fonction de pondération utilisée pour le lissage de la matrice spectrale est une fonction de Hanning d'ordre 4.

Nous avons d'une part calculé la projection des signaux synthétiques sur le premier vecteur propre et d'autre part, la somme des projections sur les huit derniers vecteurs propres, aussi appelée la section résiduelle. Les résultats sont présentés Fig. 2-14.

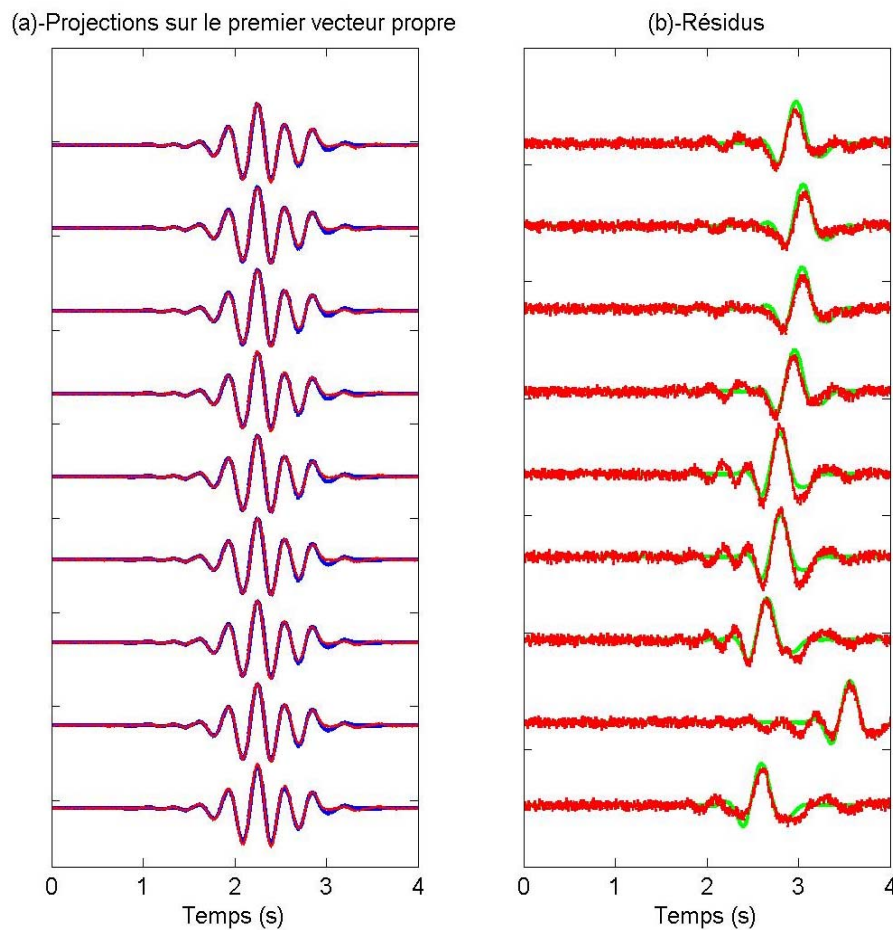


**Fig. 2-14 : (a) Superposition de la première ondelette propagée avec une vitesse infinie à travers l'antenne (courbes bleues) et de la projection des signaux synthétiques sur le premier vecteur propre (courbes rouges). (b) Superposition de la deuxième ondelette propagée avec des paramètres ( $N90^\circ, 200m/s$ ) à travers l'antenne (courbes vertes) et de la section résiduelle (courbes rouges).**

Sur cette figure, on a représenté, (a) la superposition de la première ondelette propagée avec une vitesse infinie à travers l'antenne (courbes bleues) et de la projection des signaux synthétiques sur le premier vecteur propre (courbes rouges) et (b) la superposition de la deuxième ondelette propagée avec des paramètres ( $N90^\circ, 200m/s$ ) à travers l'antenne (courbes vertes) et de la section résiduelle (courbes rouges).

Le filtrage par matrice spectrale permet de retrouver de façon quasiment parfaite la première ondelette. La section résiduelle permet clairement de mettre en évidence la deuxième ondelette. Le bruit a largement été filtré puisqu'il apparaît essentiellement sur la section résiduelle.

Cependant, les amplitudes des signaux reconstruits sur la section résiduelle ne sont pas toujours en accord avec les amplitudes initiales. De plus, des oscillations d'amplitudes non-négligeables sont présentes un peu avant l'arrivée théorique de la deuxième ondelette. L'ordre de la fenêtre de Hanning qui a été utilisée pour le lissage a alors été augmenté de manière à réduire de façon plus stricte les interactions parasites. On a fixé cet ordre à 64. Les résultats sont présentés Fig. 2-15.

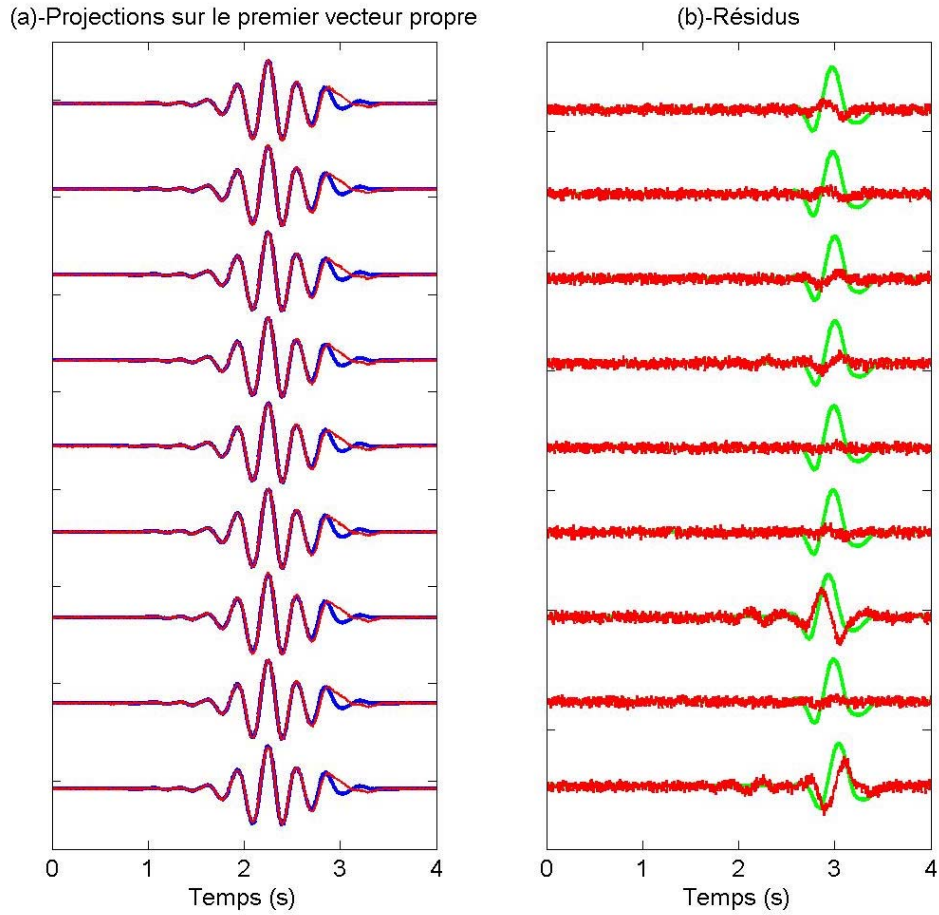


**Fig. 2-15 :** (a) Superposition de la première ondelette propagée avec une vitesse infinie à travers l'antenne (courbes bleues) et de la projection des signaux synthétiques sur le premier vecteur propre (courbes rouges). (b) Superposition de la deuxième ondelette propagée avec des paramètres ( $N90^\circ, 200m/s$ ) à travers l'antenne (courbes vertes) et de la section résiduelle (courbes rouges). L'ordre du lissage a été modifié et est maintenant égal à 64.

Dans ce cas présent, un lissage plus sévère est efficace: les amplitudes sont correctement retrouvées et les oscillations ont été atténuées.

- deux ondelettes différentes se propagent simultanément à travers l'antenne mais les paramètres de propagation sont maintenant plus proches

Cette fois-ci, les paramètres de propagation sont devenues plus proches que dans le cas précédent ou, ce qui revient au même, les décalages temporels à la deuxième phase, après remise à plat par rapport à l'ondelette dominante, sont petits d'une trace à une autre. La première ondelette se propage avec une vitesse infinie à travers l'antenne et la deuxième ondelette admet comme paramètres de propagation  $(N180^\circ, 1875m/s)$ . Le cas ainsi envisagé est maintenant plus proche de ceux que l'on s'attend à rencontrer lors de l'analyse de signaux réels. Le résultat de la projection sur les différents sous-espaces est présenté sur la **Fig. 2-16**. Une fonction de Hanning d'ordre 64 a été utilisée pour le lissage de la matrice spectrale. On peut voir que mis à part pour les capteurs 7 et 9, l'information relative à la deuxième phase n'est plus présente sur la section résiduelle mais a été projetée sur le premier vecteur propre. Les capteurs 7 et 9 sont aussi ceux pour lesquels les décalages temporels dus à la propagation de la deuxième ondelette sont les plus grands. Pour ces deux capteurs, le filtrage a été efficace mais on note cependant que la projection a introduit un décalage temporel par rapport aux signaux d'origine. Pour tous les autres capteurs, les décalages temporels de la deuxième ondelette sont faibles d'un capteur à un autre par rapport à la longueur d'onde du signal et les interactions entre les différentes phases sont trop proches du temps  $t = 0s$ . dans la fonction d'intercorrélation pour que le lissage, même très strict, ait pu être efficace.

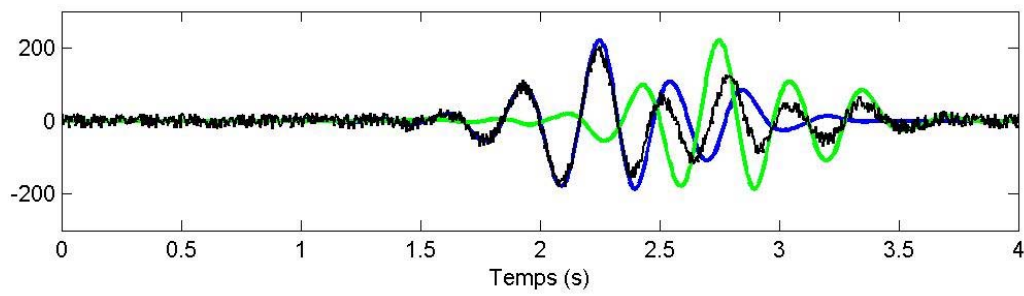


**Fig. 2-16: (a) Superposition de la première ondelette propagée avec une vitesse infinie à travers l'antenne (courbes bleues) et de la projection des signaux synthétiques sur le premier vecteur propre (courbes rouges). (b) Superposition de la deuxième ondelette propagée avec des paramètres ( $N180^\circ, 1875m/s$ ) à travers l'antenne (courbes vertes) et de la section résiduelle (courbes rouges). L'ordre du lissage est égal à 64.**

- deux ondelettes identiques se propagent simultanément à travers l'antenne et les paramètres de propagation sont identiques à ceux utilisés précédemment

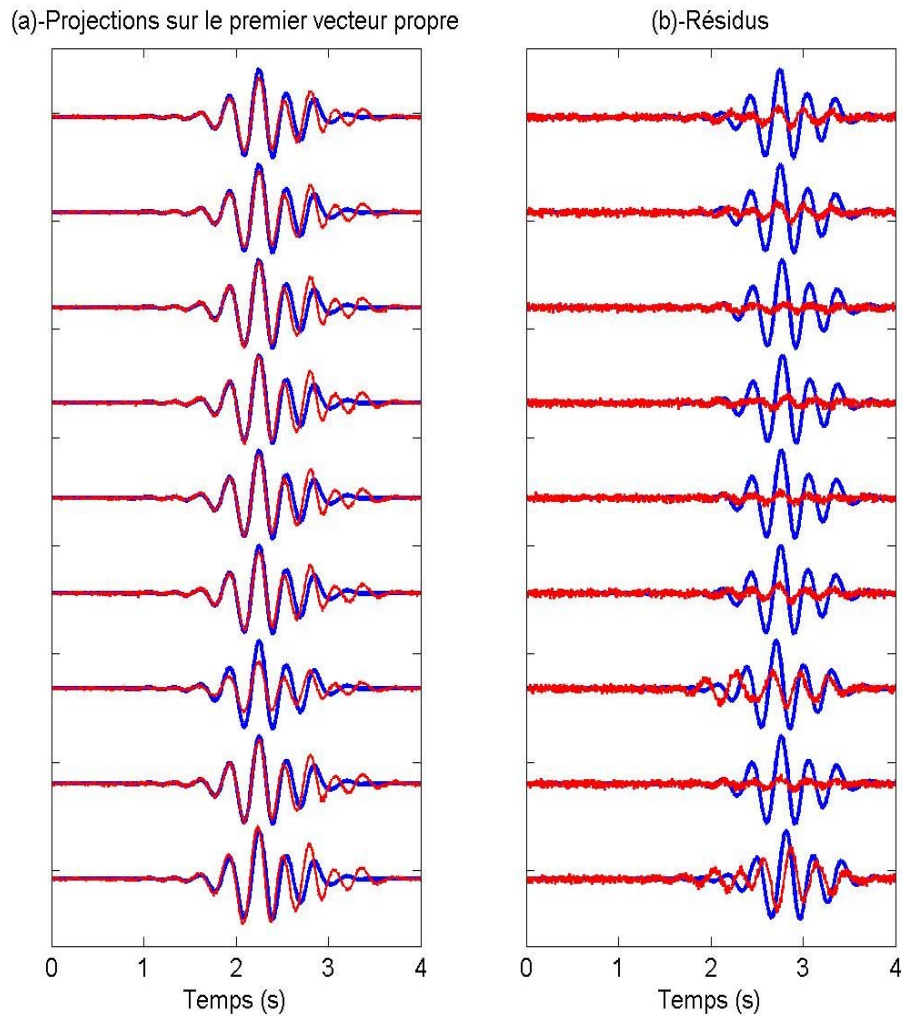
Le phénomène mis en évidence précédemment est accentué puisque nous avons maintenant mélangé deux ondelettes identiques. La première ondelette se propage toujours avec une vitesse infinie et la deuxième ondelette admet comme paramètres de propagation ( $N180^\circ, 1875m/s$ ), comme pour l'exemple précédent. Ces deux ondelettes ainsi que le signal somme résultant sont représentés sur la Fig. 2-17. Le signal bleu est la première ondelette, la signal vert est la deuxième ondelette et le signal noir est la somme des deux premières ondelettes, auquel on a superposé du bruit blanc gaussien.





**Fig. 2-17 : Les deux ondelettes initiales (en vert et bleu) et le signal synthétique résultant sur un des capteurs de l'antenne (en noir).**

Le filtrage par matrice spectrale est complètement inefficace pour ce qui est de la séparation des deux ondelettes et l'essentiel de l'information '*utile*' est projeté sur le premier vecteur propre, sauf pour les capteurs 7 et 9. Cependant, la matrice spectrale semble être, dans ce cas, un outil bien adapté pour augmenter le rapport signal sur bruit des signaux initiaux. Les résultats sont présentés sur la figure **Fig. 2-18**.

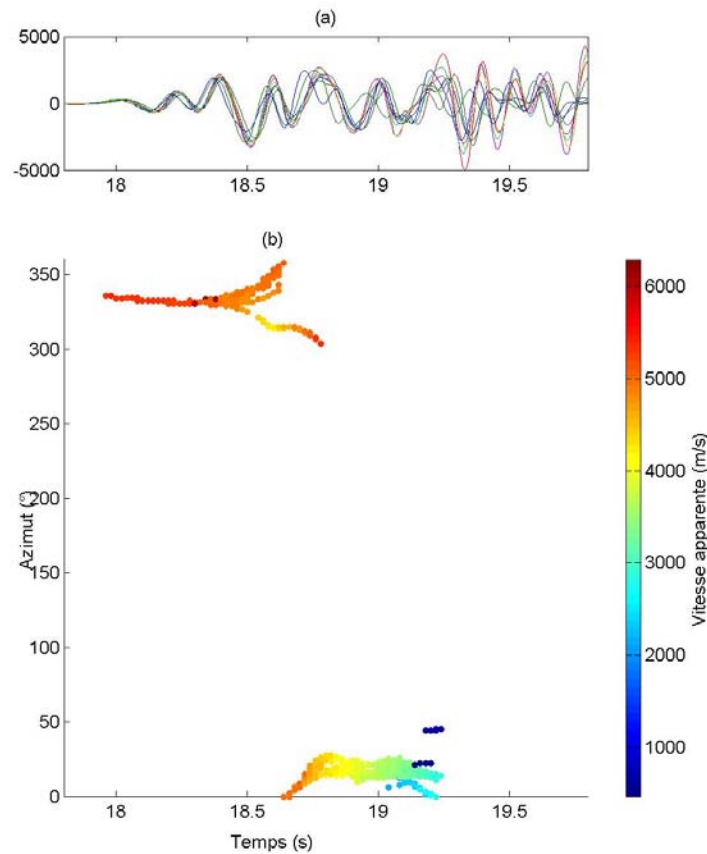


**Fig. 2-18: (a) Superposition de la première ondelette propagée avec une vitesse infinie à travers l'antenne (courbes bleues) et de la projection des signaux synthétiques sur le premier vecteur propre (courbes rouges). (b) Superposition de la deuxième ondelette propagée avec des paramètres ( $N180^\circ, 1875m/s$ ) à travers l'antenne (courbes vertes) et de la section résiduelle (courbes rouges). L'ordre du lissage est égal à 64.**

- Application à un cas réel

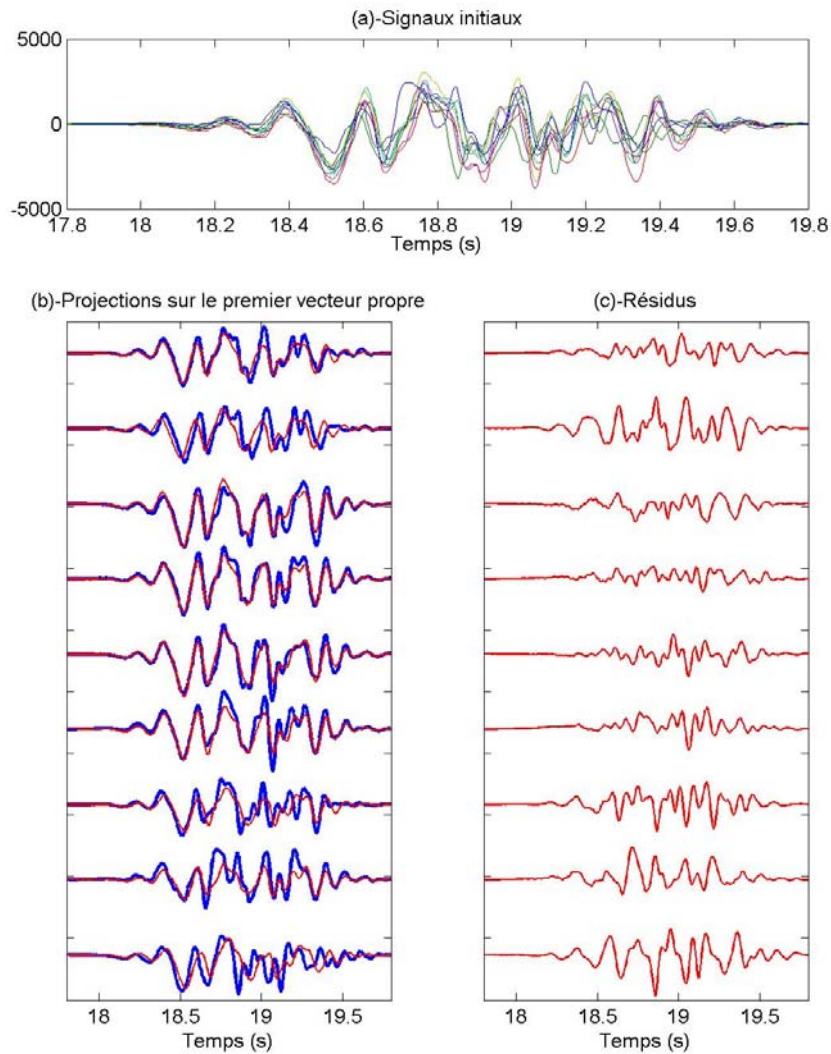
Enfin, le filtrage par matrice spectrale a été appliqué à une portion de données réelles. On s'est intéressé à une fenêtre temporelle de  $2sec.$  de signal enregistré pendant l'expérience d'*Annot* pour laquelle on a mis préalablement en évidence par décomposition en nombre d'onde que deux phases se propageaient successivement à travers l'antenne, avec des paramètres de propagation différents. La superposition des neuf signaux enregistrés par l'antenne ainsi que le résultat de la décomposition en nombre d'onde sont représentés sur la Fig. 2-19. La direction de propagation est donnée en fonction du temps et la couleur représente la vitesse apparente de propagation à travers l'antenne. Les deux phases clairement identifiées ont des paramètres de propagation qui sont ( $N330^\circ, 5500m/s$ ) et

( $N20^\circ, 3500\text{m/s}$ ). La direction  $N330^\circ$  est aussi celle de la source théorique et la première phase correspond donc à la propagation de l'onde  $P$  directe à travers l'antenne. La deuxième phase est interprétée comme une diffraction sur une hétérogénéité qui, au regard des temps de propagation, doit être localisée non loin de l'antenne.



**Fig. 2-19: (a) - Superposition des signaux réels enregistrés par les neuf capteurs de l'antenne. (b) - Evolution temporelle des directions de propagation. La couleur donne l'évolution des vitesses apparentes de propagation du champ d'onde à travers l'antenne.**

Nous avons voulu savoir si dans ce cas-là, un filtrage par matrice spectrale permettait d'une part d'extraire la phase dominante contenue dans les signaux et d'autre part, de retrouver la présence d'une phase secondaire. Ce filtrage a donc été réalisé sur les signaux remis à plat par rapport à la première phase en se servant des paramètres de propagation retrouvés par la décomposition en nombre d'onde. Les résultats de la projection sur le premier vecteur propre ainsi que la somme des projections sur les derniers vecteurs propres sont présentés sur la Fig. 2-20.



**Fig. 2-20 : (a) Signaux initiaux remis à plat sur la première phase. (b) Superposition des signaux initiaux (courbes bleues) et de leurs projections après remise à plat sur le premier vecteur propre (courbes rouges). (c) Section résiduelle.**

On voit sur cet exemple réel que le filtrage par matrice spectrale de la première phase n'a pas été efficace. La projection sur le premier vecteur propre n'a pas seulement permis de récupérer l'énergie relative à cette phase mais également toute l'énergie cohérente et relative à la deuxième phase. Le contenu fréquentiel ainsi que les paramètres de propagation sont trop semblables pour que la séparation ait pu être efficace.

## Conclusions

Nous avons testé le pouvoir de résolution de cet outil de manière à savoir s'il était possible, dans notre cas, de se servir du filtrage par matrice spectrale pour séparer les différentes ondelettes qui interfèrent dans la coda des sismogrammes régionaux. Nous avons vu qu'un tel filtrage est efficace lorsque les paramètres de propagation sont suffisamment différents les uns des autres. Glangeaud et al. (1989) présentent des résultats de séparation par la matrice spectrale sur des signaux synthétiques et en déduisent sensiblement les mêmes conclusions. Ils montrent de plus que la séparation par matrice spectrale est favorisée lorsque le rapport d'amplitude entre les différentes ondelettes à séparer devient grand. Le type d'onde auquel nous nous intéressons dans cette étude présente une gamme de vitesses apparentes de propagation variant entre 1000 m/s et 8000 m/s. L'antenne d'observation ayant une faible ouverture (250 mètres), les différentes phases qui se propageront à travers l'antenne d'observation n'auront jamais des jeux de décalages temporels très différents ou du moins assez différents pour qu'une phase dominante puisse être isolée correctement. D'autre part, le filtrage par matrice spectrale nécessite un pré-traitement des traces qu'il serait fastidieux de mettre en place puisqu'il consiste justement à rechercher les paramètres de propagation de la phase dominante. De plus, nous avons mis en évidence que même lorsque les temps de propagation relatifs à l'ondelette dominante ont correctement été corrigés, la projection des données sur le premier vecteur propre introduit un biais sur l'estimation des temps d'arrivées relatifs aux ondelettes secondaires, ce qui pourrait venir perturber tout traitement postérieur justement basé sur ces temps de propagation. Nous avons également montré que le filtrage par matrice spectrale pouvait constituer un moyen d'augmenter le rapport signal à bruit des signaux initiaux. Mais le problème est alors de déterminer combien de vecteurs propres sont utiles à décrire correctement le sous-espace '*signal*'. Une sous-estimation du nombre de vecteurs propres induirait là aussi une modification des temps d'arrivées de chacune des phases présentes et rendraient inopérant tout traitement postérieur, comme par exemple une décomposition en nombre d'onde. Nous verrons que la détermination du nombre de vecteurs propres à utiliser pour décrire correctement le sous-espace '*signal*' est la difficulté majeure de toutes méthodes basées sur la décomposition de l'espace des données en composantes orthogonales.

La matrice spectrale, dans sa formulation initiale, ne semble pas être adaptée au problème que nous avons à résoudre. Dans la prochaine section, nous présenterons l'algorithme *MUSIC* qui se rapproche du filtrage par matrice spectrale en ce sens qu'il utilise également une décomposition en composantes orthogonales. Nous donnerons les avantages de cet algorithme en termes de séparation d'ondes.

## L'algorithme MUSIC

### La théorie

Dans cette section, nous allons expliciter, un peu plus en détail, l'algorithme *MUSIC*. Il a été introduit pour la première fois par Schmidt en 1986 et est basé sur une décomposition en composantes orthogonales de l'espace formé par les données.

Re-écrivons le modèle adopté pour décrire nos signaux sismiques (Eq. 1-3) en se plaçant à une fréquence particulière  $\nu_0$ .

$$s(t, \vec{r}) = \sum_{j=1}^q A_j \exp(i(\vec{k}_j \cdot \vec{r} - 2\pi\nu_0 t + \phi_j(t))) + \eta(t, \vec{r})$$

Éq. 2-11

où on rappelle que  $q$  est le nombre de phases distinctes se propageant simultanément dans la fenêtre d'observation temporelle, les coefficients  $A_j$  et les vecteurs  $\vec{k}_j$  sont les amplitudes et les vecteurs d'ondes de chacune de ces phases.  $\eta(t, \vec{r})$  est le bruit de fond ambiant enregistré de façon continue à chaque station; on suppose qu'il n'y a aucune corrélation entre d'une part, le bruit et le signal et d'autre part, entre le bruit enregistré par chacun des capteurs. Il faut souligner ici que dans le cas d'antennes denses de capteurs, cette dernière hypothèse est rarement vérifiée pour les basse fréquence du signal. Il faudra donc systématiquement s'assurer que dans la gamme de fréquence de travail, le bruit présente un faible taux de corrélation.

On peut alors exprimer la matrice spectrale selon:

$$SM(\nu_0) = USU^* + \sigma^2 I$$

Éq. 2-12

où

$$U = \begin{bmatrix} \vec{u}(\vec{k}_1) & \vec{u}(\vec{k}_2) & \dots & \vec{u}(\vec{k}_q) \\ \downarrow & \downarrow & \dots & \downarrow \end{bmatrix}, \quad \text{avec} \quad \vec{u}(\vec{k}_i) = \begin{bmatrix} e^{i\vec{k}_i \cdot \vec{r}_1} & e^{i\vec{k}_i \cdot \vec{r}_2} & \dots & e^{i\vec{k}_i \cdot \vec{r}_{N_{trace}}} \end{bmatrix}^T$$

Le vecteur  $\vec{u}(\vec{k}_i)$  est de dimension  $(N_{trace} * I)$ , dépend du vecteur nombre d'onde  $\vec{k}_i$  et a pour effet d'appliquer un simple décalage temporel (avance ou retard pur) à chacun des signaux. La matrice  $U$  est formée par les  $q$  vecteurs  $\vec{u}(\vec{k}_i)$  et est donc de dimension  $(N_{trace} * q)$ .  $^T$  désigne l'opérateur transposé.

La matrice  $S$  a une dimension  $(q * q)$  et est diagonale. Elle contient les amplitudes moyennes de chacune des phases.

$$S = \text{diag} \begin{bmatrix} |A_1|^2 & |A_2|^2 & \dots & |A_q|^2 \end{bmatrix}$$

Éq. 2-13

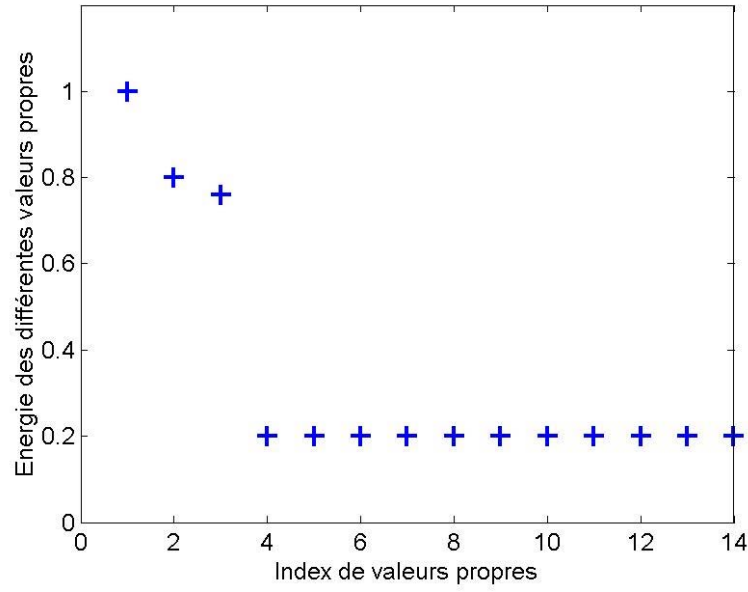
$\sigma^2$  est l'amplitude du bruit et  $I$  est la matrice identité.

L'algorithme *MUSIC* est alors exactement basé sur le même principe que le filtrage par matrice spectrale, à savoir que sa décomposition en composantes orthogonales permet de séparer l'espace des données en un sous-espace '*signal*' et un sous-espace '*bruit*'. Le sous-espace '*signal*' contient toutes les phases qui peuvent être modélisées par la propagation d'une onde plane à travers l'antenne d'observation. Chacune de ces phases est donc cohérente d'un capteur à un autre. Le sous-espace '*bruit*' contient toute l'énergie qui ne peut pas être expliquée par un processus de propagation. La projection des données sur le sous-espace '*bruit*' constitue un jeu de données résiduelles complètement incohérentes d'un capteur à un autre.

En théorie, le profil de décroissance des valeurs propres permet de déterminer combien de phases différentes se propagent simultanément à travers l'antenne. En effet, les valeurs propres de la matrice spectrale se répartissent comme suit :

- $q$  valeurs propres d'amplitudes supérieures à l'énergie du bruit et correspondant au nombre d'ondes planes se propageant simultanément dans la fenêtre d'analyse.
- $N_{\text{trace}} - q$  valeurs propres d'amplitudes égales à l'énergie du bruit.

Schématiquement, la répartition des valeurs propres se présente comme représenté sur la Fig. 2-21 où par exemple on a supposé que trois phases distinctes sont présentes dans la fenêtre d'observation à court-terme.



**Fig. 2-21 : Décroissance théorique des valeurs propres de la matrice spectrale lorsque trois ondes sont présentes dans la même fenêtre d'analyse.**

Le sous-espace '*signal*' se construit alors en sélectionnant uniquement les  $q$  premiers vecteurs propres de la matrice spectrale. Les  $N_{trace} - q$  vecteurs propres décrivent quant à eux le sous-espace '*bruit*'.

Soit  $\vec{a}(\vec{k}) = \begin{bmatrix} e^{i\vec{k} \cdot \vec{r}_1} & e^{i\vec{k} \cdot \vec{r}_2} & \dots & e^{i\vec{k} \cdot \vec{r}_{N_{trace}}} \end{bmatrix}^T$ , les vecteurs formés à partir des  $q$  vecteurs nombres d'onde gouvernant la propagation. Ces vecteurs nombres d'onde peuvent alors être déterminés en travaillant indifféremment sur le sous-espace '*signal*' ou le sous-espace '*bruit*' et en cherchant :

(a) soit les  $q$  vecteurs nombres d'onde ayant une projection maximale sur le sous-espace '*signal*', ce qui revient à chercher les  $q$  maximums de la fonction définie par:

$$P^a_{MUSIC}(\vec{k}, v_0) = \vec{a}(\vec{k})^* E_s E_s^* \vec{a}(\vec{k})$$

Éq. 2-14

(b) soit les  $q$  vecteurs nombres d'ondes ayant une projection minimale sur le sous-espace '*bruit*', ce qui revient à chercher les  $q$  maximums de la fonction définie par :

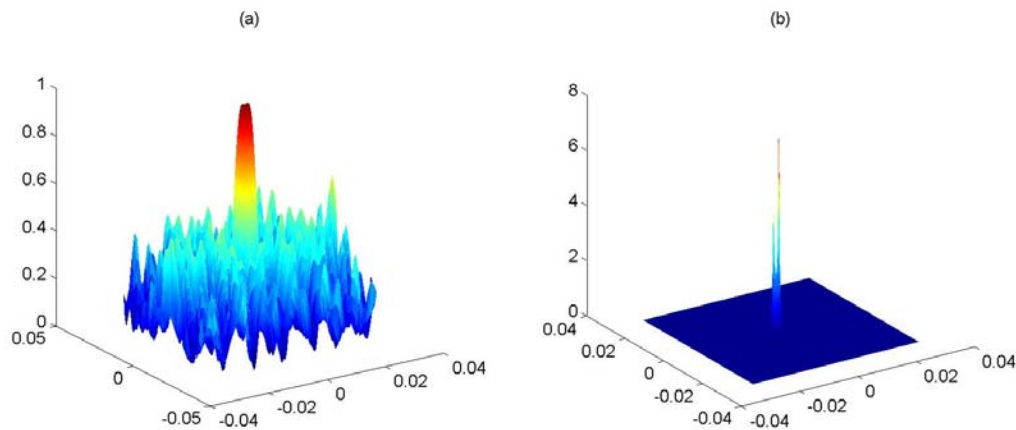
$$P^b_{MUSIC}(\vec{k}, v_0) = \frac{1}{\vec{a}(\vec{k})^* E_n E_n^* \vec{a}(\vec{k})}$$

Éq. 2-15

En théorie, ces deux estimateurs admettent exactement la même résolution. En pratique, travailler sur le sous-espace '*bruit*' permet d'une part de réduire la largeur des pics dans l'espace des nombres d'ondes et surtout, de réduire considérablement l'amplitude des pics secondaires. L'opérateur de



‘division’ présent dans l’estimateur (b) écrase l’ensemble de ces pics secondaires et les rendent d’amplitudes très négligeables par rapport à celles des pics principaux. Un exemple est présenté Fig. 2-22 où on a calculé la décomposition FK d’un signal somme de deux ondelettes de fréquences identiques et égales à 5Hz. Les paramètres de propagation des deux ondelettes sont très proches puisqu’elles admettent toutes les deux une direction de propagation égale à  $270^\circ$  et des vitesses apparentes de propagation égales à  $2500m/s$  et  $5500m/s$ . Les estimateurs  $P^a_{MUSIC}$  et  $P^b_{MUSIC}$  ont été calculés et sont représentés sur la Fig. 2-22-(a) et (b).



**Fig. 2-22: Décomposition en nombre d’onde calculée en utilisant (a) le sous-espace ‘signal’ et (b) le sous-espace ‘bruit’.** Les signaux décomposés résultent du mélange de deux ondelettes de contenu spectral identique se propageant à travers l’antenne avec des paramètres très proches.

Ceci peut être intéressant dans un cas où le nombre de phases aurait mal été estimé. Supposons par exemple que l’on estime à deux le nombre de phases présentes dans la fenêtre d’analyse, que deux phases sont réellement présentes dans cette fenêtre, mais que leurs paramètres de propagation soient trop proches pour être séparés dans l’espace des nombres d’onde. Une analyse réalisée en aveugle avec l’estimateur (a), permettra de trouver deux pics suffisamment énergétiques: le pic principal et un des nombreux pics secondaires. Si on utilise l’estimateur (b), le même pic principal sera retrouvé et le pouvoir de séparation en nombre d’onde n’en sera pas amélioré. Cependant, aucun pic secondaire ne sera pris en compte de façon automatique car aucun des pics secondaires d’énergie suffisamment forte ne pourra être trouvé.

Nous utiliserons systématiquement l’estimateur  $P^b_{MUSIC}$  pour caractériser, en terme de nombre d’onde, les différentes phases présentes dans la fenêtre d’observation.

Il est important de noter que contrairement aux décompositions *FK* classiques où l’amplitude des différents pics peut directement être reliée à l’énergie des différentes phases présentes dans le signal, la décomposition *MUSIC* perd toute notion d’amplitude. Lorsque plusieurs phases se propagent simultanément, l’estimateur défini par (b) ne permet plus de retrouver systématiquement les énergies

relatives à chacune de ces phases; un calcul supplémentaire doit alors être réalisé pour la retrouver. Ce calcul est détaillé à la fin de ce chapitre méthodologique.

### ***Algorithme MUSIC versus filtrage par matrice spectrale***

A ce stade de l'exposé, nous avons mis à notre disposition tous les éléments qui nous permettent de comprendre que l'algorithme *MUSIC* est en fait une succession de filtrage par matrice spectrale. A chaque itération, on considère un nouveau vecteur nombre d'onde  $\vec{k}$  et avant projection des signaux sur les  $q$  premiers vecteurs propres de la matrice spectrale, l'algorithme *MUSIC*, contrairement au filtrage classique, permet d'appliquer des décalages temporels aux différents signaux de manière à compenser ceux qu'induirait le passage d'une onde de fréquence  $\nu$ , dont la propagation serait caractérisée par le vecteur nombre d'onde  $\vec{k}$ . De par ces itérations successives, l'algorithme *MUSIC* permet d'aller plus loin dans l'identification des différentes composantes ondulatoires qui composent le signal. Supposons par exemple que deux ondes de fréquence identique se propagent simultanément à travers l'antenne avec des paramètres de propagation différents. Une simple projection des données, même remis à plat par rapport à l'onde dominante, sur le premier vecteur propre ne permettra pas d'identifier la présence simultanée des deux ondes. La somme des projections sur les deux premiers vecteurs propres permettra tout au plus de récupérer les deux ondes et pas de façon optimale puisqu'une remise à plat simultanée par rapport aux deux jeux de paramètres de propagation n'est pas possible. Alors, l'algorithme *MUSIC* réalise pas à pas la même opération, mais après application des décalages temporels déduit de  $\vec{k}$ . Pour les nombres d'ondes gouvernant la propagation de chacune des deux ondes, un maximum sera alors observé et la séparation, ou du moins la mise en évidence d'une propagation simultanée devient alors possible, ce qui n'est pas le cas par simple filtrage de la matrice spectrale.

### ***Validité des paramètres***

Une analyse en nombres d'ondes permet toujours de sélectionner dans l'espace des nombres d'ondes, un ou plusieurs maximums pouvant correspondre aux paramètres de propagation des différentes phases présentes dans la fenêtre d'observation. Même si on analyse une portion de signal où aucune cohérence n'est observée, on sera tout de même capable de retrouver un azimuth et une vitesse apparente. Mais la question qu'il faut alors se poser est: quelle est la validité des paramètres retrouvés par la décomposition en nombre d'onde? A quel point ces paramètres permettent-ils d'expliquer nos données?

Supposons dans un premier temps que notre but soit de détecter ou d'extraire le signal '*utile*' noyé dans des enregistrements de bruit de fond. Nous appellerons ici signal '*utile*', tout signal qui se

propage de façon cohérente à travers l'antenne. On pourra alors par exemple faire glisser une fenêtre temporelle le long des signaux et appliquer une technique de '*retard-sommation*' classique de manière à retrouver le vecteur nombre d'onde qui génère un signal-somme maximum. L'énergie de ce signal-somme pourra être comparée à l'énergie moyenne contenue dans les signaux et une mesure de la quantité d'énergie expliquée par le vecteur nombre d'onde retenu pourra être faite. Une valeur proche de 1 signifiera qu'une onde très cohérente se propage à travers l'antenne et que les paramètres de propagation retenus expliquent l'essentiel de l'énergie présente dans la fenêtre d'observation. Dans un cas comme celui-ci, la validation a posteriori des paramètres de propagation est simple à mettre en œuvre.

Revenons maintenant aux objectifs que nous nous sommes fixés dans cette thèse, à savoir une description détaillée du signal, passant par la caractérisation simultanée de phases multiples se propageant à travers l'antenne. Utilisé convenablement, nous montrerons que l'algorithme *MUSIC* est plus adapté qu'un algorithme classique pour satisfaire nos objectifs. Mais alors, lorsque plusieurs jeux de paramètres de propagation sont retenus, comment vérifier, au même titre que celui qui utilise une décomposition FK classique et qui recherche donc un jeu unique de paramètres, la validité *a posteriori* de nos résultats ?

Dans un premier temps, on pourrait imaginer utiliser des techniques dérivées de celles du type '*retard-sommation*' en les adaptant au cas où plusieurs ondes se propagent simultanément à travers l'antenne. On pourrait par exemple évaluer l'énergie obtenue par sommation des signaux après remise à plat par rapport aux paramètres de propagation relatifs à chacune des composantes trouvées par la décomposition en nombres d'ondes. Une énergie serait alors attribuée à chacune des composantes. Mais comment calculer l'énergie véhiculée par une de ces phases sans que celle véhiculée par toutes les autres phases n'intervienne ? En fait, la somme des énergies portées par les différentes phases serait alors supérieure à l'énergie globale contenue dans la fenêtre d'observation, ce qui pose un réel problème d'interprétation.

Une autre solution, qui avait initialement été envisagée, est de se servir des techniques de séparation d'ondes identiques à celles proposées par le filtrage par matrice spectrale pour évaluer soit l'énergie relative à chacune des phases identifiées par la décomposition en nombre d'ondes, soit l'énergie contenue globalement dans le sous-espace '*signal*'. Nous avons déjà vu que le filtrage par matrice spectrale ne permettait pas, dans notre cas, d'évaluer l'énergie portée par chacune des phases. La séparation n'est pas optimale et la même énergie serait prise en compte plusieurs fois. Cela nous conduirait au même problème que celui cité précédemment, à savoir que la somme des énergies associées à chacune des phases serait supérieure à l'énergie globale contenue dans les signaux. L'autre solution serait alors non pas d'évaluer séparément l'énergie véhiculée par chacune des phases, mais celle véhiculée par l'ensemble des phases mises en évidence par la décomposition en nombres d'ondes. Cela revient à projeter les signaux initiaux sur le sous-espace '*signal*' et à évaluer leur énergie globale. Mais nous avons également vu qu'une projection optimale nécessitait une remise à

plat des ondes à extraire. Comme il n'est pas possible de remettre simultanément à plat les différentes phases présentes dans la fenêtre d'analyse, il y aura toujours un biais dans l'estimation de l'énergie des phases détectées par décomposition en nombre d'onde.

Nous proposons alors une autre solution qui consiste à se servir des paramètres trouvés par la décomposition temps-fréquence-nombre d'onde pour reconstruire les signaux initiaux. L'énergie de ces signaux reconstruits sera ensuite comparée à celle des signaux initiaux. Le rapport des deux énergies nous permettra de quantifier le taux d'énergie expliquée par les paramètres retrouvée lors de la décomposition en nombre d'onde. Les équations servant à la reconstruction des signaux sont données dans le paragraphe '*Principe de reconstruction des signaux*'.

### *Principe de reconstruction des signaux*

Dans ce paragraphe, nous avons noté  $sig(t, \vec{r})$  les signaux enregistrés par l'antenne et  $\hat{sig}(t, \vec{r})$ , les signaux. Ecrivons le modèle adopté pour décrire la partie déterministe contenue dans nos signaux (Eq. 1-3) autour de la fréquence  $\nu_0$ . L'équation correspondant à ce modèle devient alors:

$$\hat{sig}(t, \vec{r}) = \sum_{i=1}^q A_i \sin(\vec{k} \cdot \vec{r} - 2\pi\nu_0 t + \phi_i(t))$$

Éq. 2-16

Les seuls paramètres inconnus, après décomposition en nombres d'ondes, sont les amplitudes  $A_i$  de chacune des ondelettes et leurs phases ou leurs retards temporels  $\phi_i$ . Ces paramètres peuvent être retrouvés en minimisant au sens des moindres carrés l'écart entre les données observées et les signaux reconstruits par l'Éq. 2-16, c'est à dire en minimisant la fonction erreur  $E$  qui s'exprime par :

$$E = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{N_{trace}} \left( sig(t_i, \vec{r}_k) - \hat{sig}(t_i, \vec{r}_k) \right)^2$$

Éq. 2-17

L'Éq. 2-16 peut se développer comme:

$$\hat{sig}(t_i, \vec{r}_k) = \sum_{j=1}^q \left[ A_j \sin(\vec{k}_j \cdot \vec{r}_k - 2\pi\nu_0 t_i) \cos(\phi_j) + A_j \cos(\vec{k}_j \cdot \vec{r}_k - 2\pi\nu_0 t_i) \sin(\phi_j) \right]$$

Éq. 2-18

Posons alors  $T_{1j} = A_j \cos(\phi_j)$  et  $T_{2j} = A_j \sin(\phi_j)$ .

Éq. 2-19

Minimiser la fonction erreur revient à égaliser les quantités observées  $sig(t_i, \vec{r}_k)$  aux quantités estimées  $\hat{sig}(t_i, \vec{r}_k)$ , et ceci pour chacun des points d'échantillonnages temporels  $t_i$  et pour chacun des vecteurs positions  $\vec{r}_k$ . On aboutit alors au système d'équations qui s'écrit :

$$[sig(t, \vec{r})] \approx [COSIN(\vec{r})] \begin{bmatrix} \hat{T} \\ T \end{bmatrix}$$

Éq. 2-20

avec :

- $[sig(t, \vec{r})] = [sig(t_1, \vec{r}_1) \quad sig(t_2, \vec{r}_1) \quad \dots \quad sig(t_N, \vec{r}_{N_{trace}})]^T$ , la matrice de dimension  $(N * N_{trace}, I)$  qui regroupe les quantités observées pour chaque échantillon de la fenêtre temporelle et chaque capteur.

- $[COSIN(\vec{r})] = \begin{bmatrix} w(\vec{r}_1) \cdot \sin(\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 - 2\pi v_0 t_1) & \dots & w(\vec{r}_{N_{trace}}) \cdot \sin(\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_{N_{trace}} - 2\pi v_0 t_N) \\ w(\vec{r}_1) \cdot \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 - 2\pi v_0 t_1) & \dots & w(\vec{r}_{N_{trace}}) \cdot \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_{N_{trace}} - 2\pi v_0 t_N) \\ \dots & \dots & \dots \\ w(\vec{r}_1) \cdot \cos(\vec{k}_q \cdot \vec{r}_1 - 2\pi v_0 t_1) & \dots & w(\vec{r}_{N_{trace}}) \cdot \cos(\vec{k}_q \cdot \vec{r}_{N_{trace}} - 2\pi v_0 t_N) \end{bmatrix}^T$ , la matrice de

dimension  $(N * N_{trace}, 2q)$  qui regroupe les sinus et les cosinus présentant des oscillations de fréquence  $v_0$  et se propageant à travers l'antenne avec les paramètres de propagation trouvés par la décomposition en nombre d'onde. Les amplitudes  $A_i$  et les phases  $\phi_i$  donneront les amplitudes de chacun de ces sinus et cosinus ainsi que leurs instants d'occurrence. Les  $w(\vec{r}_i)$  sont des poids appliqués sur les fonctions sinus et cosinus et permettent de prendre en compte l'effet de fenêtrage induit par la fenêtre d'observation à court-terme et d'imposer une forme d'onde a priori. Cette dernière est différente pour chaque capteur puisqu'elle est obtenue à partir de l'enveloppe de chacun des signaux que l'on cherche à reconstruire.

- $\begin{bmatrix} \hat{T} \\ T \end{bmatrix} = [T_{1I} \quad T_{2I} \quad \dots \quad T_{2q}]^T$ , la matrice de dimension  $(2q * I)$  contient les inconnues  $A_i$  et  $\phi_i$ .

Par inversion du système défini Éq. 2-20, on récupère :

$$\begin{bmatrix} \hat{T} \\ T \end{bmatrix} = [COSIN^T COSIN]^{-I} COSIN^T \hat{sig}$$

Éq. 2-21

et grâce aux équations Éq. 2-19, on retrouve les inconnues  $A_i$  et  $\phi_i$ . On est alors en mesure de reconstruire les signaux et d'estimer la quantité d'énergie expliquée grâce aux paramètres de propagation retrouvés en ayant supposé que  $q$  phases se propagent simultanément à travers l'antenne d'observation. Cette quantité d'énergie s'exprime par:

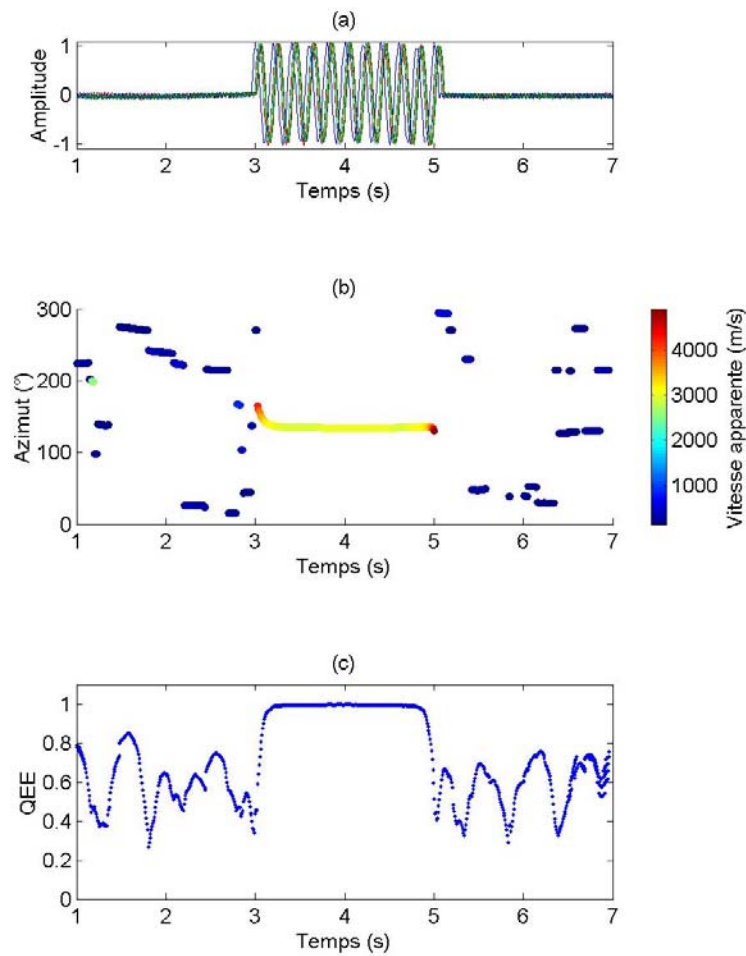
$$QEE(q_{phases}) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{N_{trace}} \left( \hat{sig}(t_i, \vec{r}_k) \right)^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{N_{trace}} \left( sig(t_i, \vec{r}_k) \right)^2}$$

Éq. 2-22

Zerva et Zhang (1996) ont proposé l'utilisation de l'algorithme *MUSIC* pour retrouver les caractéristiques des ondes sismiques émanant de ruptures en différents points le long de la faille. Les

auteurs montrent ensuite, sur un exemple analytique, qu'il est possible de reconstruire entièrement les déplacements enregistrés à chaque station de l'antenne, à partir des paramètres retrouvés par l'analyse en nombres d'ondes. L'algorithme de reconstruction que nous utilisons ici est basé sur les travaux réalisés par ces deux auteurs, lors de cette étude.

Nous avons testé le pouvoir de reconstruction sur un cas synthétique pour lequel une seule onde monochromatique se propage à travers l'antenne avec des paramètres ( $N120^\circ, 3000\text{m/s}$ ). Nous avons estimé, pour chaque fenêtre d'analyse, la quantité  $QEE$  définie précédemment. Nous n'avons systématiquement introduit qu'un seul vecteur propre dans la description du sous-espace 'signal'. Les résultats sont présentés Fig. 2-23.



**Fig. 2-23 : (a) Superposition des ondes sinusoïdales (fréquence 5Hz) simulées pour les différents capteurs de l'antenne. (b) Evolution temporelle des direction de propagation retrouvées par décomposition temps-fréquence-nombre d'onde. La couleur associée à chaque détection donne une estimation de la vitesse apparente de propagation de l'onde à travers l'antenne. (c) La quantité d'énergie expliquée à chaque instant dans le signal grâce aux paramètres retrouvés par la décomposition.**

On observe que pour  $t$  compris entre 3s. et 5s., la quantité d'énergie est constamment voisine de 1 alors que pour les fenêtres analysant du bruit seul, elle prend des valeurs inférieures qui fluctuent

autour de la valeur 0.5 , entre 0.3 et 0.85 . Ces fluctuations sont à rapprocher du niveau du bruit de fond moyen présent dans la fonction de transfert de l'antenne (voir paragraphe 1.1.2). Pour chaque fenêtre d'analyse, la quantité  $QEE$  ainsi que la valeur de la fonction erreur  $E$  seront calculées et les paramètres de propagation ne seront retenus que si  $QEE$  est suffisamment proche de 1 ou, ce qui revient au même,  $E$  suffisamment proche de 0.

## **Détermination du nombre de sources**

### *Repères bibliographiques*

L'opération la plus délicate dans la mise en œuvre des méthodes de décomposition en composantes orthogonales est sans doute celle qui consiste à estimer le nombre de composantes qui se propagent simultanément dans la fenêtre d'analyse et à la même fréquence (nous appellerons également ce nombre le nombre de source puisque la présence de composantes ondulatoires multiples vient de l'existence de sources secondaires (ou hétérogénéités) présentes dans le milieu de propagation). En théorie, il suffit de compter la multiplicité des valeurs propres les plus faibles de la matrice spectrale pour connaître le nombre de vecteurs propres à introduire dans le sous-espace '*signal*'. En pratique, la décroissance des valeurs propres est loin de ressembler à la décroissance synthétique représentée Fig. 2-21 et il n'est donc pas possible d'adopter directement ce critère. D'une part, l'hypothèse selon laquelle le bruit et le signal sont complètement incohérents n'est jamais vérifiée. D'autre part, comme le souligne Bienvenu (1983), les signaux que nous étudions sont limités temporellement et contiennent donc peu d'échantillons. La matrice spectrale n'est alors qu'une quantité estimée et cette estimation s'améliore avec le nombre d'échantillons utilisés pour la calculer. Compte tenu de ces deux dernières remarques, des méthodes visant à déterminer malgré tout le nombre de vecteurs propres à introduire dans le sous-espace '*signal*' ont été proposés par différents auteurs.

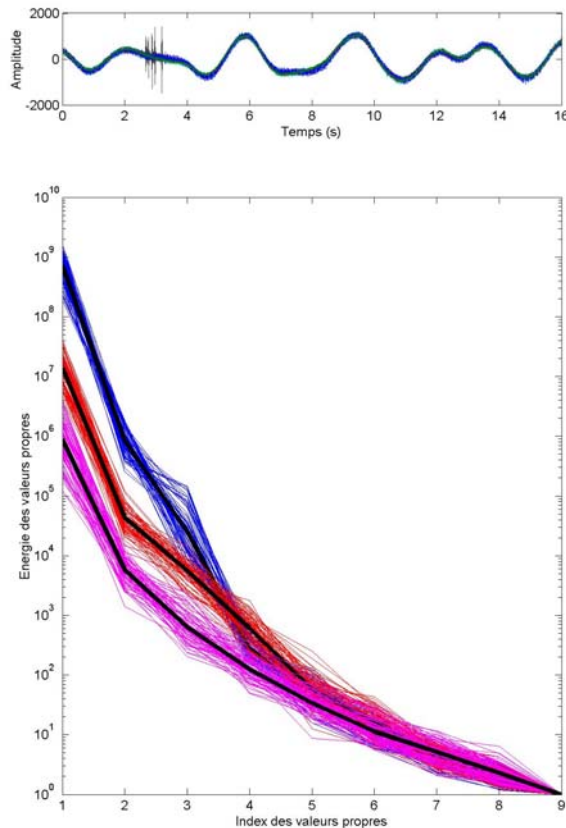
La façon la plus simple de procéder est d'observer le profil de décroissance et de déterminer pour quel indice de valeur propre, une rupture est observée. Le problème de ce critère est qu'il dépend directement de la subjectivité de l'utilisateur.

Des méthodes probabilistes ont alors été introduites (Bienvenu, 1983), qui ne nécessitent pas de fixer un seuil *a priori*. On peut également citer les travaux de Wax et Kailath (1985) qui proposent d'utiliser des critères déduits de la théorie de l'information comme le critère *AIC* (Akaike Information Criterion) et *MDL* (Minimum Description Length). Marcos (1998) remarque que ces tests statistiques conduisent souvent à une surestimation du nombre de sources, qui de surcroît est difficilement contrôlable.

Une autre alternative consiste à comparer le profil de décroissance avec celui du bruit seul et à déterminer à partir de quel indice de valeurs propres, les deux profils ne se superposent plus (Marcos, 1998). Cornou (2002), qui a utilisé les décompositions en composantes orthogonales pour caractériser les effets de résonance 3D du champ d'onde dans la vallée grenobloise (Isère), a utilisé cette technique en montrant préalablement que les valeurs propres du bruit de fond présentaient une décroissance exponentielle. Nous avons également voulu adopter cette solution pour l'analyse des signaux enregistrés pendant la campagne d'*Annot* et nous avons donc cherché à modéliser le profil de décroissance des valeurs propres du bruit ambiant présent autour de l'antenne d'enregistrement. La Fig. 2-24 présente un exemple des décroissances observées autour de trois différentes fréquences.



Chaque profil a été normalisé par rapport à la valeur propre la plus faible. Un profil moyen de décroissance a été superposé pour chaque fréquence. On remarque que ce profil n'est pas stable lorsqu'on fait varier la fréquence d'analyse. Il faudrait donc, pour être tout à fait rigoureux, estimer un profil de décroissance du bruit seul pour chacune des fréquences d'analyse.

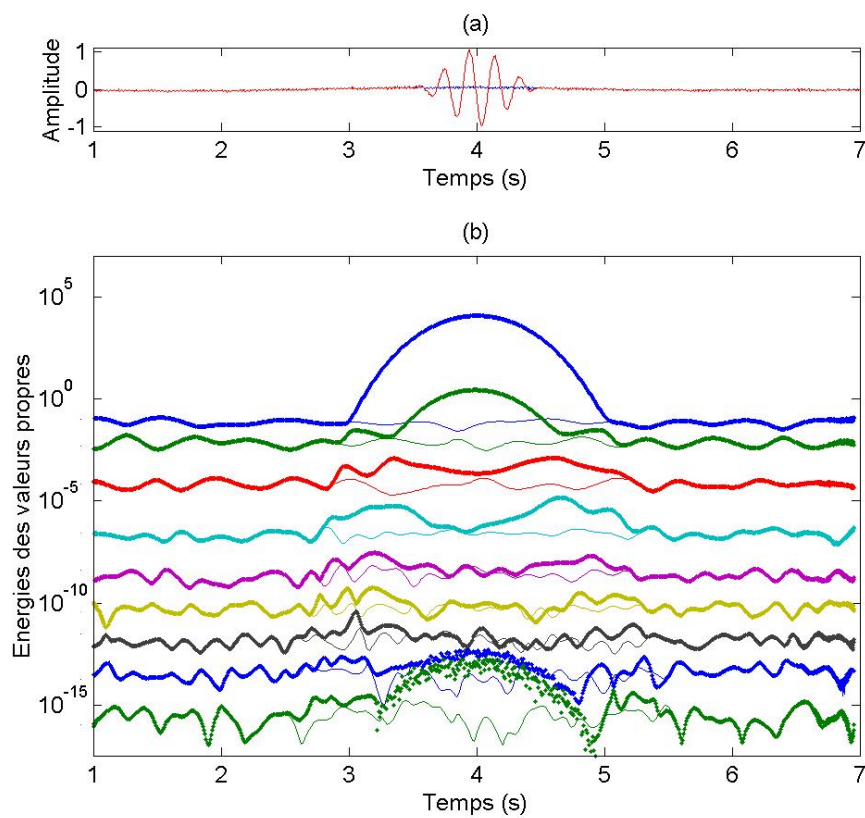


**Fig. 2-24 : 16sec. de bruit de fond enregistré pendant l'expérience d'Annot par l'antenne 'Métailles' (haut). Décroissances du bruit de fond calculée en utilisant une fenêtre glissante le long du signal et valeur médiane pour trois valeurs différentes de fréquence: 1Hz (bleu), 3Hz (rouge) 10Hz (magenta) (bas).**

Cette décroissance varie beaucoup pour les basses fréquences et devient plus stable pour les hautes fréquences.

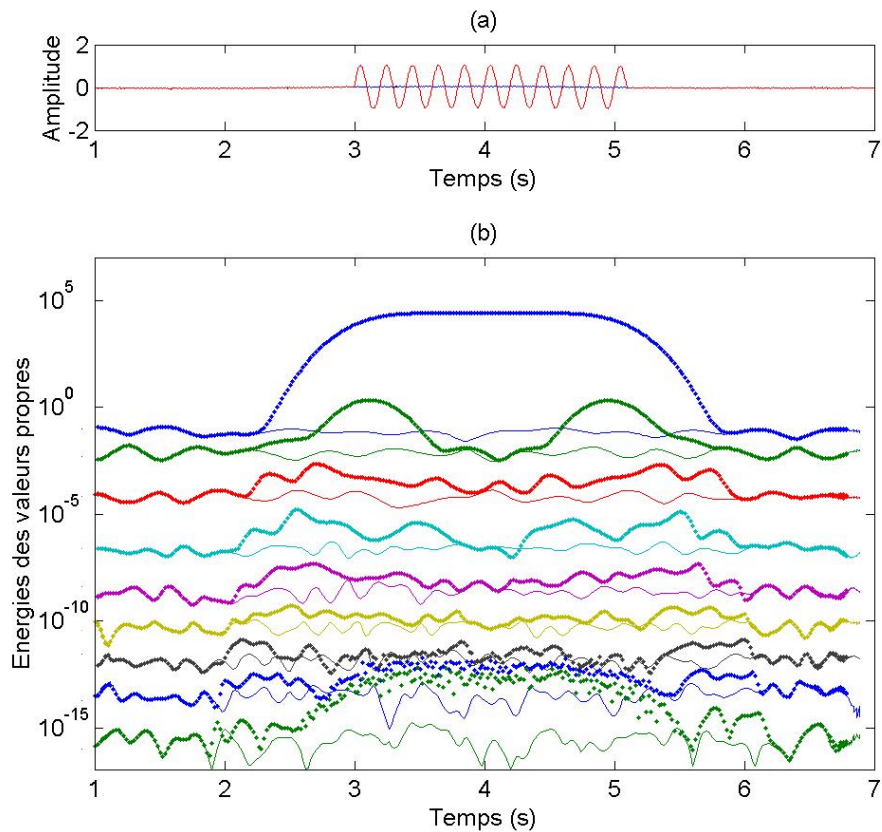
Considérons à présent que le profil de décroissance a été estimé autour d'une fréquence donnée et comparons cette décroissance à celle calculée lorsqu'une seule onde monochromatique se propage à travers l'antenne. La figure Fig. 2-25 représente l'évolution temporelle des différentes valeurs propres lorsque seul du bruit a été analysé. Nous avons ensuite superposé au bruit réel, une seule ondelette et nous avons calculé la décroissance des valeurs propres de la matrice spectrale de ces signaux. Le résultat a été superposé aux valeurs propres caractérisant le bruit de fond. On voit clairement que la première valeur propre augmente lorsque l'on commence à analyser du signal. Cependant, on constate également une augmentation des valeurs propres suivantes et cette augmentation est due au fait qu'on

analyse un signal transitoire. En effet, la même analyse a été menée sur un signal de durée temporelle supérieure (Fig. 2-26). Le même phénomène que celui précédemment mis en évidence est observé dans les parties transitoires du signal. Là où le signal est stationnaire, seule la première valeur propre est supérieure à l'énergie du bruit de fond, les autres valeurs propres ont une amplitude comparable à celles du bruit.



**Fig. 2-25 :** (a) Le bruit seul (*en bleu*) et la superposition de l'ondelette analysée avec le bruit (*en rouge*). (b) Comparaison de la décroissance des valeurs propres lorsque seul du bruit est présent (*trait fin*) et lorsqu'une onde transitoire est

superposé au bruit (*trait épais*).



**Fig. 2-26: (a) Le bruit seul (*en bleu*) et la superposition de l'ondelette analysée avec le bruit (*en rouge*). (b) Comparaison de la décroissance des valeurs propres lorsque seul du bruit est présent (*trait fin*) et lorsqu'une onde stationnaire est superposé au bruit (*trait épais*).**

### Discussion

Nous nous montrons réfractaire à l'utilisation des critères statistiques car nous ne sommes pas en mesure de les rattacher physiquement au problème que nous cherchons à résoudre et n'aurons donc aucun contrôle *a posteriori* sur le nombre de sources déduit d'une telle analyse. D'autre part, nous avons vu que le critère qui consiste à modéliser la décroissance des valeurs propres du bruit de fond et à se servir de ce modèle unique pour la détermination du nombre de sources n'est pas adapté au cas d'*Annot* où le bruit présente de fortes variations sur l'ensemble de la gamme de fréquence étudiée. De

plus, dans le cas d'*Annot*, nous analyserons simultanément les données enregistrés par quatre antennes différentes. Le bruit étant variable spatialement, ces profils seraient à estimer séparément pour chacune des antennes. Nous avons également montré que même si un modèle adéquat pourrait être trouvé pour la décroissance du bruit de fond, il est impossible, lorsque le signal présente des non-stationarités, de faire la différence entre un cas où une seule onde est présente dans la fenêtre d'analyse et celui où plusieurs ondes sont simultanément présentes puisque dans les deux cas, une augmentation des valeurs propres est observée. Par contre, dans les parties stationnaires du signal, les valeurs propres de la matrice spectrale présentent la décroissance qu'on s'attend à observer.

### *Critère du maximum d'énergie expliquée*

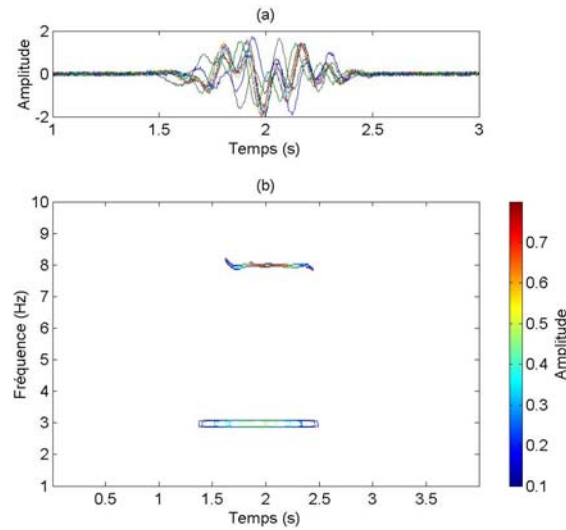
Nous allons proposer une approche différente pour déterminer le nombre de vecteurs propres à utiliser dans la description des sous-espaces '*signal*' et '*bruit*'. Cette approche est indépendante des valeurs propres de la matrice spectrale et donc de leur décroissance. Un processus itératif sur le nombre de sources contenues dans le sous-espace '*signal*' va être mis en place. A chaque itération, une source supplémentaire est ajoutée dans la description du sous-espace '*signal*' et une quantité, permettant d'évaluer ce qu'apporte l'augmentation du nombre de vecteurs propres, va être définie. Nous avons choisi de considérer pas à pas, les paramètres de propagation retrouvés par la décomposition en nombre d'onde et de reconstruire nos signaux grâce à ces paramètres et aux équations introduites précédemment. A chaque étape du processus itératif, la quantité *QEE* (Éq. 2-22) sera alors estimée et nous permettra de mesurer l'impact d'un vecteur propre supplémentaire dans le sous-espace '*signal*'. Si pendant plusieurs itérations successives cette quantité d'énergie reste stationnaire, le processus s'arrête. L'efficacité ainsi que les limitations de ce critère seront explicités dans les paragraphes suivants à travers différents exemples synthétiques.

### ***Analyse TFK et séparation d'ondes: Jusqu'où peut-on aller?***

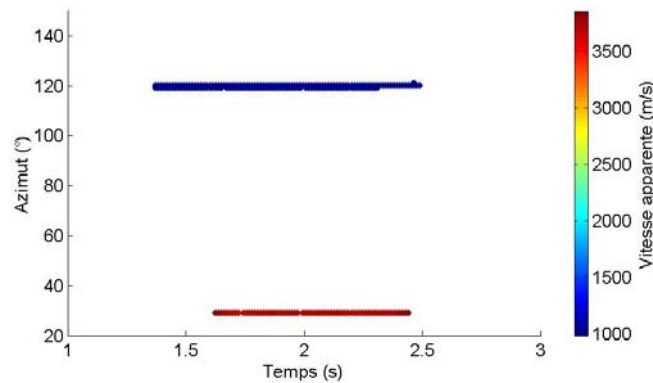
Lorsqu'une seule onde est présente dans la fenêtre d'analyse, n'importe quelle analyse temps-fréquence-nombre d'onde est capable d'identifier ses caractéristiques. Toute la méthodologie développée dans les paragraphes précédents a permis de mettre au point une analyse de décomposition haute-résolution des sismogrammes dans le but d'avoir une meilleure compréhension des situations complexes pour lesquelles une analyse classique n'est plus valable. Nous avons déjà montré que lorsqu'une seule onde est présente dans le signal, la décomposition temps-fréquence-nombre d'onde retrouve de façon optimale l'ensemble de ses paramètres (Fig. 2-23). Nous allons complexifier pas à pas les signaux de manière à avoir une idée de jusqu'où on peut espérer aller en terme de séparation d'onde.

### Ondes non-corrélées

Considérons d'abord le cas simple où deux ondelettes complètement décorrélées fréquemment se propagent simultanément à travers l'antenne. La décomposition temps-fréquence permet de mettre en évidence la présence des deux composantes ondulatoires (Fig. 2-27). Une décomposition fréquence-nombre d'onde autour de chacune des fréquences identifiées permettra de retrouver les paramètres de propagation. Les résultats obtenus dans ce cas sont représentés Fig. 2-28. Les paramètres théoriques des 2 ondelettes sont respectivement  $(3\text{Hz}, 120^\circ, 1000\text{m/s})$  et  $(8\text{Hz}, 30^\circ, 4000\text{m/s})$  et ont correctement été retrouvés.



**Fig. 2-27 : (a) Superposition de 2 ondelettes de fréquences dominantes 3 et 8Hz. (b) Décomposition en lignes de crêtes associé au signal (a).**



**Fig. 2-28 : Evolution Temps-Azimut-Vitesse apparente de propagation des signaux représentés Fig. 2-27-(a).**

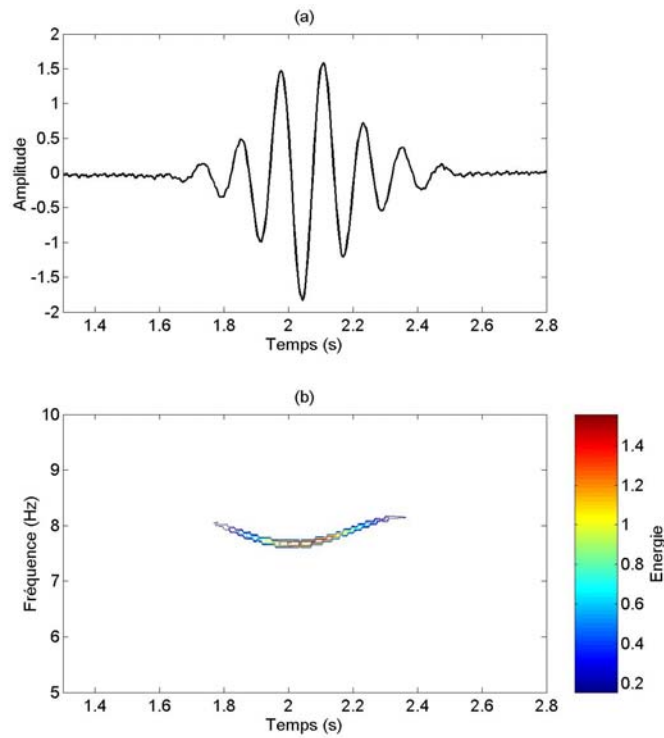
### *Ondes faiblement corrélées*

Nous avons ensuite augmenté la complexité de nos signaux puisque les deux ondelettes ont maintenant des contenus spectraux trop voisins pour que la décomposition en lignes de crêtes puissent clairement les séparer. Une seule ligne de crête a été identifiée (Fig. 2-29) et est le résultat d'interférences constructives entre les deux ondelettes de fréquences égales à  $7\text{Hz}$  et  $8\text{Hz}$ . Les paramètres théoriques de propagation sont  $(N50^\circ, 4000\text{m/s})$  et  $(N330^\circ, 1000\text{m/s})$ . La décomposition en nombre d'onde a été réalisée le long de cette ligne de crêtes de manière à extraire les paramètres de propagation des différentes ondes en présence. Ici, pour chaque fenêtre d'analyse, nous avons calculé la fonction que nous appellerons Gain (G), qui estime le pourcentage d'énergie supplémentaire expliquée lorsqu'on passe de la description du sous-espace '*signal*' avec un seul vecteur propre à celle avec deux vecteurs propres. Cette fonction est donc définie par :

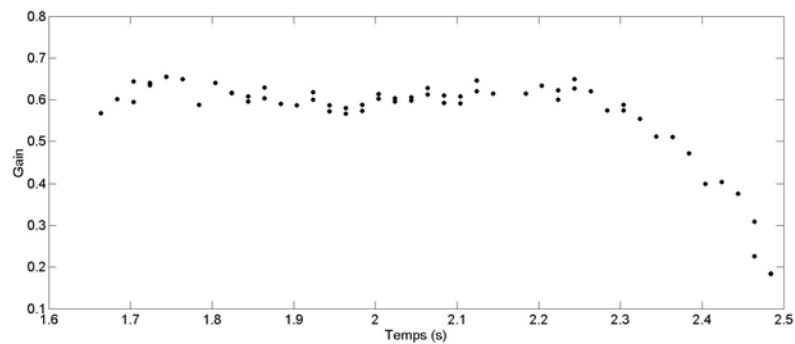
$$G_{12} = 1 - \text{RMS}(2VP) / \text{RMS}(1VP)$$

**Éq. 2-23**

Lorsque l'on passe d'un sous-espace '*signal*' décrit par un seul vecteur propre à un sous-espace '*signal*' décrit par deux vecteurs propres, on observe une augmentation de la fonction gain qui est en moyenne égale à 0.6. Cela signifie que la quantité d'énergie expliquée avec un seul vecteur propre augmente environ de 60% lorsqu'on rajoute un deuxième vecteur propre dans la description du sous-espace '*signal*' (Fig. 2-30). Les résultats de la décomposition en nombres d'ondes montrent qu'on a bien séparé les deux ondelettes en présence et identifié leurs paramètres de propagation respectifs (Fig. 2-31). Les azimuts de propagation sont mieux estimés que les vitesses apparentes de propagation.

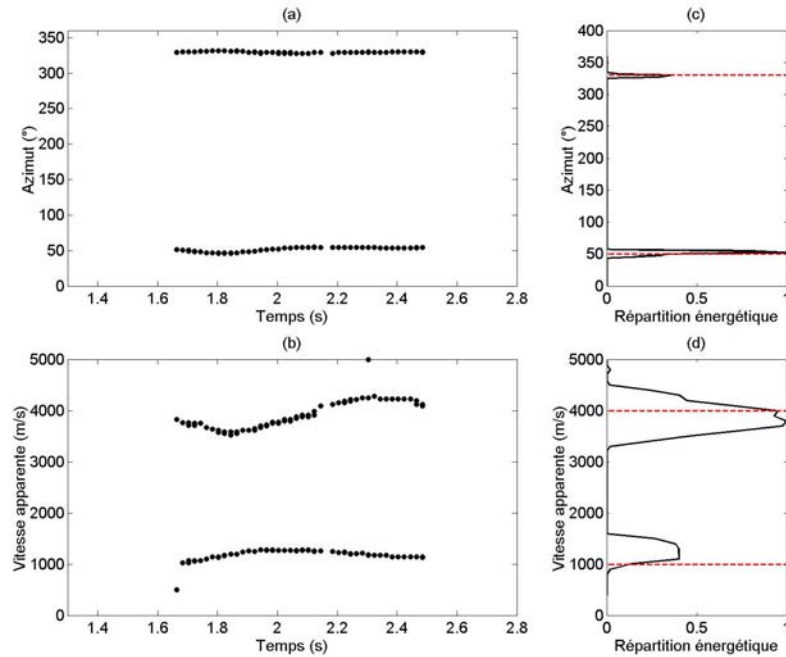


**Fig. 2-29 : (a) Signal simulé sur un des capteurs de l'antenne, mélange de deux ondelettes de contenus spectraux 7 et 8Hz. (b) Décomposition en lignes de crêtes.**



**Fig. 2-30 : Gain lorsqu'on passe de l'utilisation d'un seul vecteur propre dans la description du sous-espace 'signal' à l'utilisation de deux vecteurs propres.**



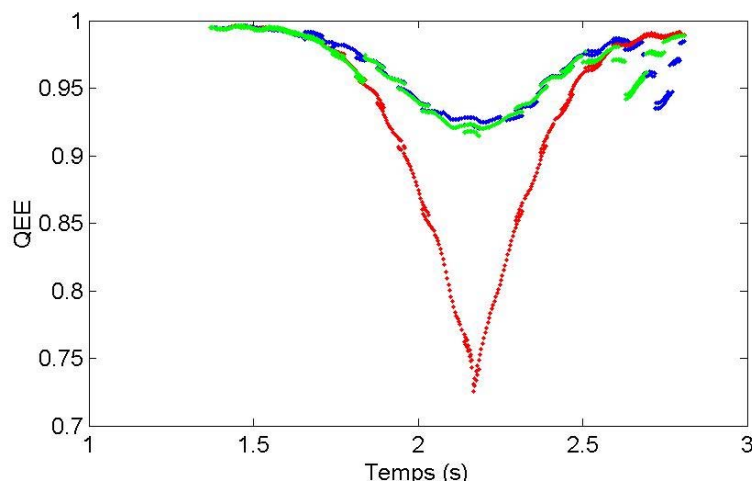


**Fig. 2-31 : Evolution temps-azimut-vitesse pour un sous-espace ‘signal’ décrit par deux vecteurs propres. Les paramètres de propagation théoriques des deux ondelettes sont  $(N50^\circ, 4000\text{ m/s})$  et  $(N330^\circ, 1000\text{ m/s})$ .**

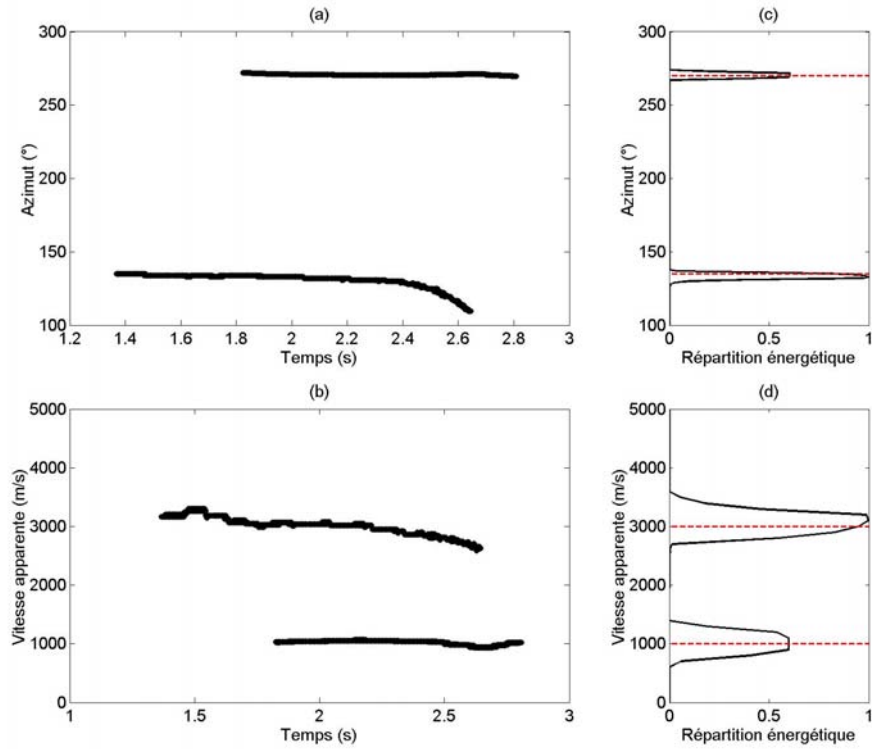
On constate cependant qu’il existe des biais quant à l’estimation des paramètres de propagation. Ces biais sont plus importants pour l’estimation des vitesses apparentes que pour celles des directions de propagation. Nous avons associé à la décomposition temps-fréquence-nombre d’onde, une répartition énergétique des directions et des vitesses de propagation (voir la section ‘*Répartition énergétique*’ de ce chapitre pour le calcul des distributions énergétiques). On observe alors que si la vitesse de l’onde se propageant à 4000m/s est correctement retrouvée, la vitesse moyenne associée à l’onde se propageant à 1000m/s est légèrement surestimée.

Ce dernier exemple justifie également pourquoi le Scalogramme a été préféré au Spectrogramme. De par sa mise en œuvre, la capacité de séparation du Scalogramme diminue lorsque la fréquence augmente alors que celle de la décomposition en nombres d’ondes augmente avec la fréquence. Il est donc préférable de favoriser la séparation en fréquence des composantes basse fréquence, puisque nous savons qu’il est peu probable que nous les séparions dans l’espace des nombres d’ondes. Au contraire, lorsque le contenu fréquentiel des composantes augmente, la séparation n’est plus forcément réalisée dans le plan temps-fréquence mais celle dans l’espace des nombres d’ondes est alors favorisée.

Considérons maintenant le cas le plus défavorable en terme de séparation d'ondes, à savoir celui où deux ondelettes parfaitement corrélées se propagent simultanément à travers l'antenne. Dans un premier temps, le temps de propagation qui sépare l'arrivée des deux ondelettes a été fixé à  $0.35s$ . Un rapport d'amplitude égale à  $0.8$  existe entre les deux ondelettes utilisées. Le contenu spectral moyen des ondelettes se situe autour de  $5Hz$ . Les paramètres de propagation sont  $(N135^\circ, 3000\text{ m/s})$  et  $(N270^\circ, 1000\text{ m/s})$ . Pour cet exemple, nous avons également voulu montrer l'efficacité de notre critère de sélection du nombre de sources. La quantité d'énergie expliquée est représentée sur la Fig. 2-32 lorsque respectivement un seul et deux vecteurs propres ont été utilisés pour construire le sous-espace 'signal'. On voit clairement qu'entre  $1.8s.$  et  $2.6s.$ , la quantité d'énergie expliquée par un seul vecteur propre diminue. La prise en compte d'un seul vecteur propre ne suffit donc pas à décrire correctement les données. Lorsqu'un deuxième vecteur propre est introduit dans le sous-espace 'signal', la quantité d'énergie expliquée augmente d'environ  $20\%$ , ce qui compte tenu des remarques faites précédemment est une augmentation importante. De plus, on vérifie également que la prise en compte d'un troisième vecteur propre ne permet pas une meilleure explication de nos données. Les paramètres de propagation correspondants sont représentés sur la Fig. 2-33 et sont parfaitement bien retrouvés.



**Fig. 2-32 :** Quantité d'énergie expliquée lorsque respectivement un vecteur propre (rouge), deux vecteurs propres (vert) et trois vecteurs propres (bleu) ont été utilisés pour construire le sous-espace 'signal'.

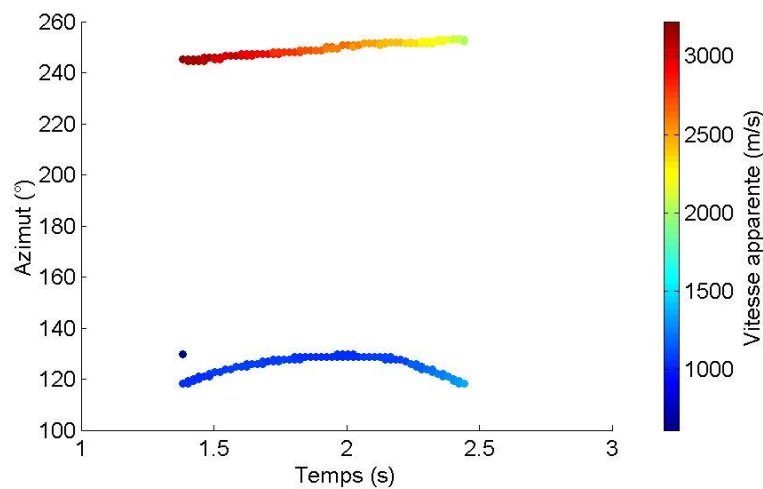


**Fig. 2-33 : Evolution temps-azimut-vitesse lorsque deux vecteurs propres ont été introduits dans le sous-espace ‘signal’. Les paramètres de propagation théoriques des deux ondelettes sont  $(N135^\circ, 3000\text{ m/s})$  et  $(N270^\circ, 1000\text{ m/s})$ .**

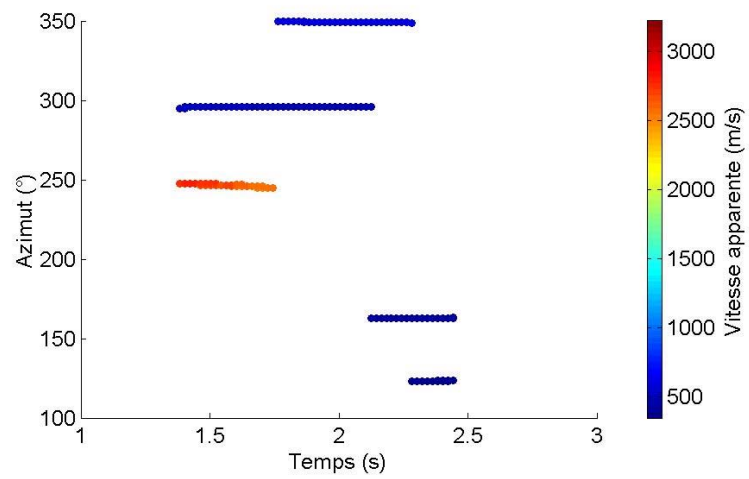
Les distributions énergétiques des directions et des vitesses apparentes de propagation permettent également de retrouver le rapport d’amplitude qui existe entre les deux ondelettes utilisées pour construire nos signaux synthétiques. En effet, si on fait un rapport entre l’énergie associée à la propagation de la première ondelette ( $E(135^\circ, 3000\text{ m/s})$ ) et celle associée à la propagation de la deuxième ondelette ( $E(270^\circ, 1000\text{ m/s})$ ), on trouve que  $E(270^\circ, 1000\text{ m/s})/E(135^\circ, 3000\text{ m/s})=0.6$ . Or, le rapport d’énergie qui existe entre les deux ondelettes initiales est égale à 0.64. Le bilan énergétique traduit donc bien le poids dans le signal de chacune des ondelettes.

La situation devient plus critique lorsque le temps qui sépare l’arrivée des deux phases est très faible. Ici, nous avons réduit ce temps à  $0.08\text{ s}$ . La même démarche que précédemment a été appliquée et on détecte toujours parfaitement la présence simultanée des deux ondes (voir Fig. 2-34). Cependant, les paramètres de propagation retrouvés ne correspondent plus exactement à ceux introduits dans le modèle, en particulier pour l’onde qui possède une forte vitesse de propagation. La raison principale est que les ondes interfèrent à des temps de propagation très proche ce qui entraîne des interactions fortes entre les différentes phases, que le lissage de la matrice spectrale ne suffit plus à atténuer. Un biais systématique est introduit dans l’estimation des paramètres de propagation. Plusieurs auteurs ont montré la nécessité d’introduire un lissage spatial dès lors que des ondes corrélées se propagent à

travers l'antenne. La présence simultanée d'ondes très corrélées donne naissance à des termes supplémentaires dus aux interactions entre les différentes ondes qui viennent perturber les termes non-diagonaux de la matrice spectrale. Cela pose généralement un problème de sous-estimation du nombre de sources (Shan et al., 1985). Le lissage spatial permet alors d'une part l'atténuation de ces termes et d'autre part une meilleure répartition des valeurs propres. De par la géométrie des antennes déployées pendant l'expérience d'*Annot*, il n'a pas été possible de mettre en place de tels lissages. Néanmoins, le critère de sélection du nombre de sources que nous avons finalement choisi d'adopter n'est pas basé sur la décroissance de l'énergie des valeurs propres et nous ne serons donc pas confrontés au problème de sous-estimation du nombre de sources. Néanmoins, les termes d'interférences n'ont pas été diminués pour autant et peuvent venir perturber l'estimation des paramètres de propagation. C'est le phénomène qui est observé dans cet exemple, où un biais important est présent dans l'estimation de l'azimut et de la vitesse apparente de chacune des ondelettes. Nous avons cependant calculé les paramètres que l'on aurait obtenus si une méthode classique du type '*retard-sommation*' avait été utilisée. Deux maximums ont systématiquement été recherchés dans l'espace des nombres d'ondes. Les résultats sont présentés Fig. 2-35. On constate que la présence simultanée des deux ondes n'a pas été détectée et les paramètres de propagation des deux ondes n'ont pas été retrouvés. L'algorithme *MUSIC* présente donc une supériorité à séparer différentes composantes ondulatoires, même lorsque celles-ci sont très corrélées et qu'aucun lissage spatial n'est appliqué.



**Fig. 2-34 : Evolution temps-azimut-vitesse lorsque deux vecteurs propres ont été utilisés pour construire le sous-espace '*signal*'. Les paramètres de propagation théoriques des deux ondelettes sont  $(N135^{\circ}, 3000m/s)$  et  $(N270^{\circ}, 1000m/s)$ .**



**Fig. 2-35 :** Evolution temps-azimut-vitesse lorsque une méthode classique type '*retard-sommation*' a été utilisé.

## Répartition énergétique

Pour certaine des décompositions temps-fréquence-nombre d'onde calculées tout au long de ce chapitre, nous avons associé une distribution énergétique des directions et des vitesses de propagation tout au long du signal. Pour calculer ces distributions d'énergie, il faut commencer par estimer l'énergie de chacune des différentes phases identifiées dans chacune des fenêtres temporelles d'analyse. Zerva et Zhang (1996) ont montré que l'énergie de chacune de ces différentes phases pouvait être retrouvée à partir des valeurs propres et des vecteurs propres du sous-espace '*signal*'. Ils précisent néanmoins que cette inversion est valide uniquement lorsque les signaux sont complètement décorrélés. Dans ce travail, nous cherchons justement à séparer des phases qui présentent un important taux de corrélation. Cette façon d'attribuer l'énergie à chacune des phases ne sera donc pas utilisé.

Nous utiliserons la reconstruction des signaux introduite dans la section '**Principe de reconstruction des signaux**' de ce chapitre pour évaluer l'énergie moyenne associée à chacune des phases. Lorsque  $q$  phases auront été détectées dans une certaine cellule temps-fréquence, l'énergie  $E_q$  moyenne associée à chacune des phases est donnée par :

$$E_q = \frac{1}{T_{LARG} \cdot N_{trace}} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_{trace}} \left( \hat{sig}_q(t_i, \vec{r}_j) \right)^2$$

Éq. 2-24

où  $\hat{sig}_q$  sont les signaux reconstruits relativement à la source  $q$ .  $T_{LARG}$  est la largeur de la fenêtre temporelle et  $N_{trace}$ , le nombre de capteurs utilisés pour déterminer les paramètres de propagation.

Une autre quantité qu'il serait intéressant de pouvoir évaluer est la quantité d'énergie du sismogramme que nous sommes capables d'expliquer par une propagation déterministe à travers l'antenne. Cette quantité permettrait de donner une mesure du degré de compréhension que nous avons de l'énergie globalement présente dans les sismogrammes. Néanmoins, cette quantité est difficile à évaluer par un calcul simple. En effet, les fenêtres d'analyse à court-terme, introduites à la fois dans le domaine temporel et fréquentiel, présentent un fort taux de recouvrement et conduisent alors à une surestimation de l'énergie que nous sommes capables d'expliquer par rapport à l'énergie réellement contenue dans les signaux. Cornou (2002) propose une technique qui permet d'estimer le taux d'énergie globalement expliqué par une propagation déterministe, en supprimant la quantité supplémentaire d'énergie introduite par l'utilisation des fenêtres d'observation à court-terme.

## ***Incertitudes sur les paramètres de propagation et Pouvoir de séparation***

### *Les incertitudes sur les paramètres de propagation*

De nombreux facteurs entrent en compte dans l'estimation des paramètres de propagation (intensité et structure du bruit de fond, nombre de capteurs, géométrie de l'antenne, nombre de phases présentes simultanément). Cependant, d'un point de vue pratique, une grille dans l'espace des vecteurs nombres d'ondes sera construite, et l'estimateur  $P^b_{MUSIC}$  sera calculé pour chacun des vecteurs échantillonnés par la grille. Les incertitudes sur la détermination des paramètres de propagation sont donc directement liées à la finesse d'échantillonnage de cette grille ou plus précisément, au nombre de points utilisés pour la construire et au type de maillage adopté.

L'incertitude sur la direction et la vitesse de propagation sont données par l'Éq. 2-25 et l'Éq. 2-26.

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta v}{v} + \frac{\Delta k}{k}$$

Éq. 2-25

$$\Delta\theta = \cos(\theta)\sin(\theta)\left(\frac{\Delta k_E}{k_E} + \frac{\Delta k_N}{k_N}\right)$$

Éq. 2-26

$k_E$  et  $k_N$  sont les composantes géographiques E-O et N-S du vecteur nombre d'onde.

L'incertitude sur l'azimut est entièrement gouvernée par l'erreur que l'on commet lorsqu'on estime le vecteur nombre d'onde. L'incertitude sur la détermination de la vitesse de propagation dépend quant à elle à la fois du vecteur nombre d'onde et de la fréquence.

### **Influence du type de maillage**

On considère dans un premier temps que l'incertitude sur la fréquence de l'onde est nulle. Deux types de maillages différents ont alors été considérés:

(a) un maillage régulier (**MR**) en nombre d'onde :  $\Delta k = CTE$  sur l'ensemble de la grille

(b) un maillage irrégulier (**MIR**) en nombre d'onde :  $\frac{\Delta k}{k} = CTE$  sur l'ensemble de la grille

Ces 2 situations ont schématiquement été représentées sur la Fig. 2-36.

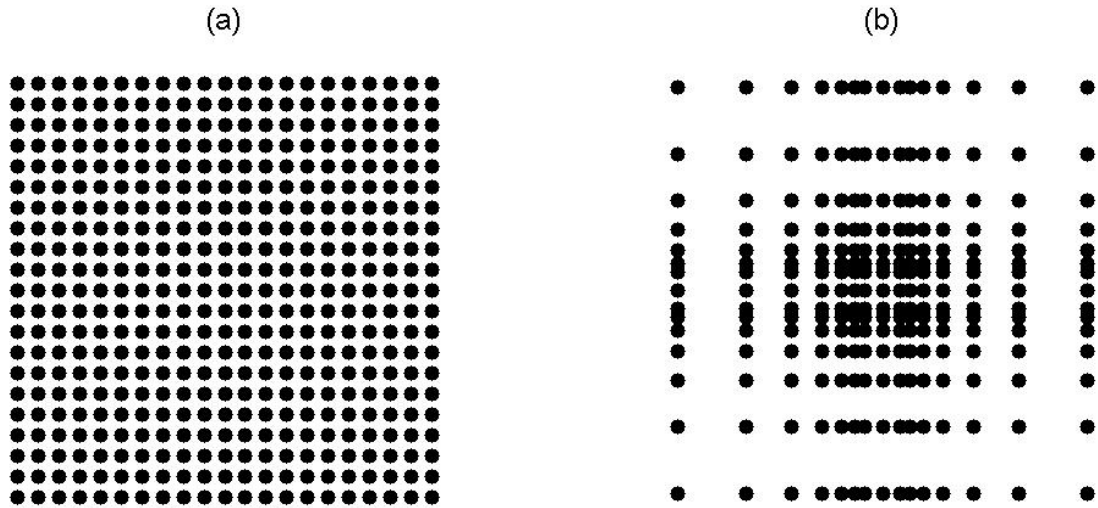


Fig. 2-36 : (a) maillage régulier (MR) dans l'espace des nombres d'ondes. (b) maillage irrégulier (MIR) dans l'espace des nombres d'ondes.

Que ce soit dans le cas d'un MR ou MIR, le vecteur nombre d'onde varie dans l'intervalle  $[-0.03m^{-1}, 0.03m^{-1}]$  qui est aussi l'intervalle dans lequel on est certain de ne pas être confronté à des problèmes d'aliasing pour l'antenne *Annot* (voir chap. I). Dans les deux cas, nous nous sommes fixés une grille de dimension égale à  $[250 * 250]$  points de manière à ne pas tendre vers des temps de calcul démesurés.

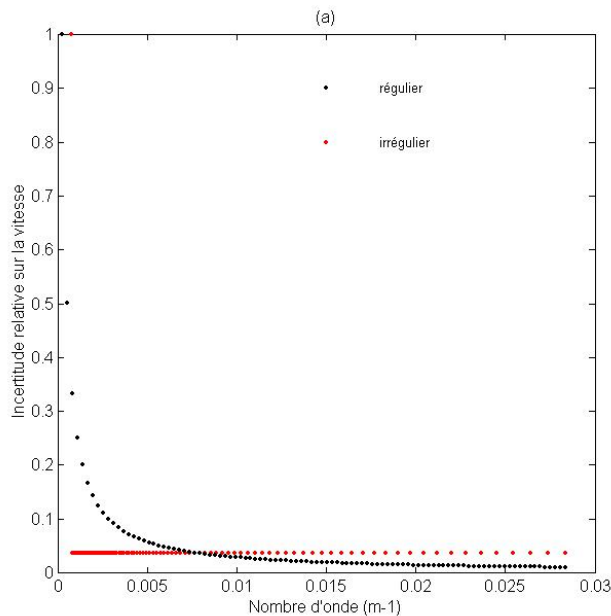
#### □ Incertitude sur la vitesse de propagation

Dans le cas d'un MR, l'incertitude relative est inversement proportionnelle à  $|\vec{k}|$  et est donc très grande pour les nombres d'ondes faibles, c'est à dire les vitesses élevées. Par exemple, si une onde de fréquence égale à  $5Hz$  se propage à travers l'antenne avec une direction de propagation égale à  $45^\circ$  et une vitesse théorique égale à  $5000m/s$ , la décomposition en nombre d'onde qui utilisera un MR permettra de déterminer sa vitesse de propagation avec une incertitude proche de  $25\%$ , c'est à dire  $\pm 1250m/s$ .

Dans le cas d'un MIR, l'incertitude relative est constante quel que soit le nombre d'onde. Ici, avec une grille de dimension  $[250 * 250]$  points et un nombre d'onde variant entre  $[-0.03m^{-1}, 0.03m^{-1}]$ , on aboutit à une incertitude relative égale à  $3.5\%$ , ce qui est bien meilleur pour caractériser les trains d'ondes se propageant à des vitesses élevées. Si on reprend l'exemple précédent, l'incertitude sur la vitesse de propagation sera alors réduite à  $175m/s$ . Pour les nombres d'ondes supérieurs à  $0.01m^{-1}$ , on constate que l'incertitude relative sur les vitesses de propagation estimées avec un MR devient



inférieure à celle estimée avec un MIR. Cependant, ces deux courbes restent tout de même assez proches l'une de l'autre.



**Fig. 2-37 : Incertitude relative sur la vitesse apparente de propagation en fonction du nombre d'onde. La courbe noire correspond au cas d'un MR et la courbe rouge à celui d'un MIR.**

#### □ Incertitude sur l'azimut

Concernant l'incertitude sur la direction de propagation (Fig. 2-38), elle dépend, et ceci quel que soit le type de maillage, de la direction de propagation elle-même. Dans les deux cas, les directions de propagation proches de  $45^\circ \text{ [mod } 90^\circ]$  se retrouvent fortement défavorisées alors que les directions de propagation proches de  $90^\circ \text{ [mod } 90^\circ]$  présentent une incertitude quasi-nulle.

On a calculé pour les deux types de maillage, l'erreur maximale induite par l'échantillonnage en nombre d'onde sur l'estimation de l'azimut. Les résultats sont présentés sur la Fig. 2-38. L'incertitude sur l'azimut est représenté en fonction de la vitesse de propagation. Les différentes courbes correspondent à différentes valeurs de la fréquence. Des figurés différents ont été utilisés suivant que l'on s'intéresse à un MR ou MIR.

Dans le cas d'un MR, l'incertitude sur l'azimut peut devenir très grande, en particulier pour les ondes de basses fréquences, se propageant avec des vitesses élevées, c'est-à-dire pour les ondes caractérisées par des faibles valeurs de nombre d'onde. Si on reprend l'exemple précédent, où une onde de contenu fréquentiel égal à  $5\text{ Hz}$  se propage avec une vitesse égale à  $5000\text{ m/s}$ , l'incertitude sur l'azimut est égale à  $20^\circ$ .

Dans le cas d'un MIR, on réduit fortement l'erreur sur l'azimut, et ceci quel que soit le nombre d'onde. Ceci peut être observé Fig. 2-38 où les courbes correspondant à un MIR présentent des

incertitudes sur l'azimut bien inférieures à celles que l'on obtiendrait en utilisant un MR. L'incertitude sur l'azimut qui était égale à  $20^\circ$  lorsque l'on cherche à caractériser une onde de fréquence égale à  $5\text{ Hz}$ , se propageant à  $5000\text{ m/s}$ , se réduit maintenant à  $3^\circ$ .

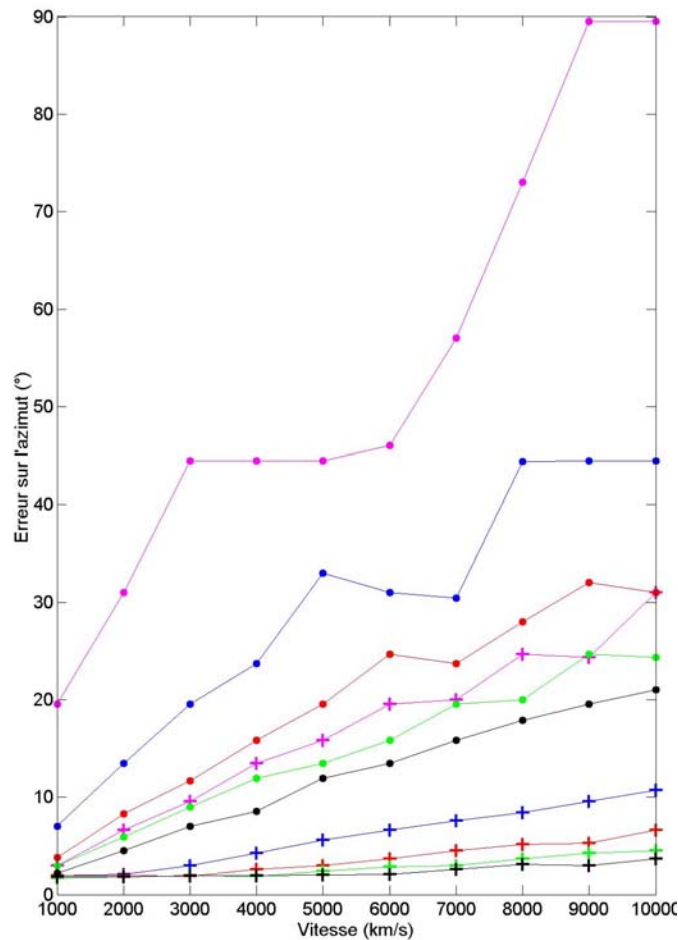
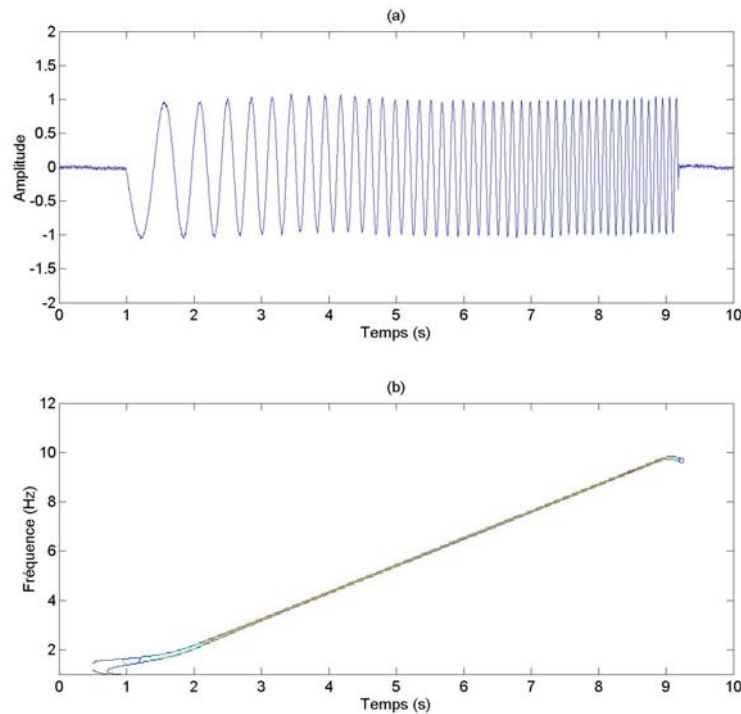


Fig. 2-38 : Erreur maximale commise sur l'estimation de l'azimut en fonction de la vitesse de propagation. La couleur représente les différentes fréquences : 1Hz, 3Hz, 5Hz, 7Hz et 9Hz. Les points correspondent au cas d'un MR en nombre d'onde et les croix au cas d'un MIR en nombre d'onde.

### Exemple

Le cas d'une modulation linéaire en fréquence ( $1\text{ Hz} - 10\text{ Hz}$ ) a été synthétisé et propagé à travers une antenne type 'Annot'. Le signal ainsi construit est représenté sur la Fig. 2-39-(a) pour un des capteurs de l'antenne ainsi que la décomposition temps-fréquence correspondante (Fig. 2-39-(b)). L'azimut théorique de propagation est  $N30^\circ$  et deux valeurs différentes de vitesses apparentes de propagation ont été considérées ( $1000\text{ m/s}$  et  $5000\text{ m/s}$ ). La décomposition en nombre d'onde a été

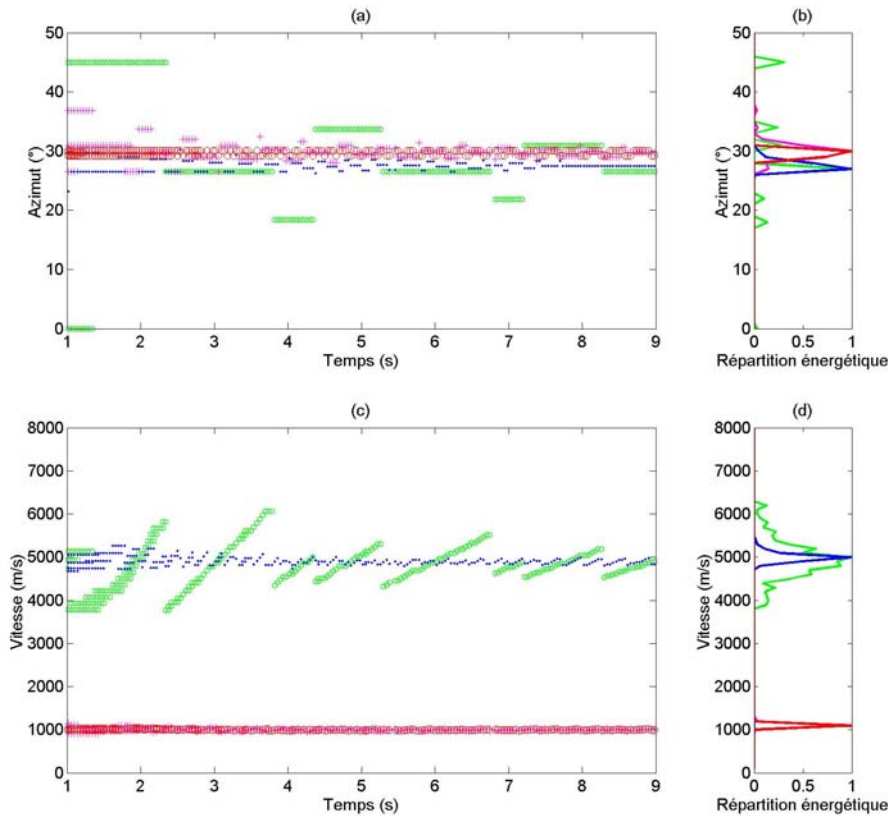
réalisée dans le cas d'un MR et MIR. Dans chacun des cas, un maillage de  $[250 * 250]$  points a été construit.



**Fig. 2-39 : (a) Modulation linéaire de fréquence entre 1 et 10Hz. (b) Décomposition en lignes de crêtes correspondant au signal représenté en (a).**

Que ce soit pour l'estimation de l'azimut ou de la vitesse apparente, le cas le plus défavorable est obtenu lorsqu'on cherche à caractériser une onde rapide ( $5000\text{ m/s}$ ) avec un MR (Fig. 2-40). Pour les basses fréquences, c'est-à-dire les petits nombres d'onde, la situation se dégrade encore et on peut avoir jusqu'à  $1000\text{ m/s}$  d'erreur sur la vitesse de propagation et  $15^\circ$  pour l'azimut. Avec un MIR, on ne dépasse jamais plus de  $200\text{ m/s}$  d'erreur sur les vitesses de propagation et  $2^\circ$  pour les azimuts. Pour les faibles vitesses de propagation ( $1000\text{ m/s}$ ), les erreurs d'estimations s'atténuent lorsque l'on utilise un MR, puisqu'on analyse des nombres d'ondes plus grands. Cependant, ces erreurs sont encore plus faibles lorsque l'on utilise un MIR de l'espace des nombres d'onde.

Les Fig. 2-40-(b) et Fig. 2-40-(d) montre la répartition énergétique des azimuts et des vitesses de propagation. Que ce soit pour les vitesses ou les directions de propagation, les répartitions énergétiques admettent toujours un maximum autour des paramètres théoriques de propagation. On observe cependant, pour les champs d'onde se propageant à  $5000\text{ m/s}$ , on réduit fortement les incertitudes sur l'estimation des vitesses de propagation (voir la largeur du pic de la distribution énergétique des vitesses, courbe bleue).



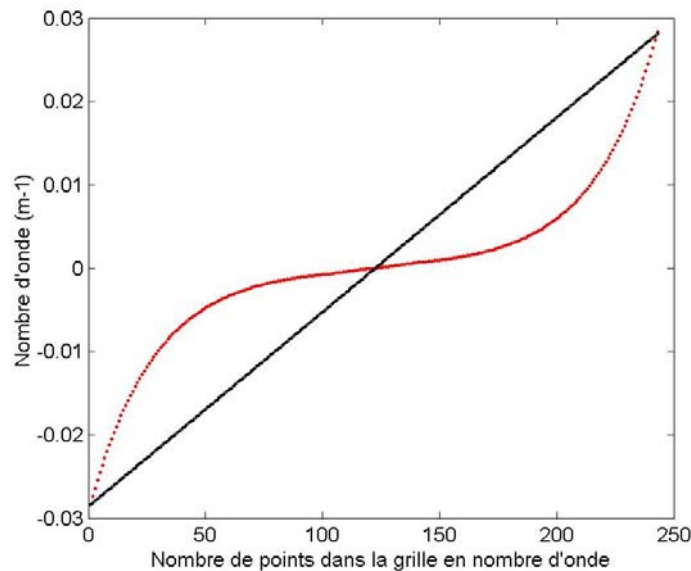
**Fig. 2-40 : (a) Evolution de l'azimut en fonction du temps. (b) Répartition énergétique des azimuts de propagation. (c) Evolution de la vitesse en fonction du temps. (d) Répartition énergétique des vitesses de propagation. Maillage irrégulier et vitesse = 5000m/s - (bleu), maillage irrégulier, vitesse = 1000m/s - (rouge), maillage régulier, vitesse = 5000m/s - (vert), maillage régulier, vitesse = 1000m/s - (rose).**

## Conclusions

Si on compare les incertitudes théoriques relatives aux paramètres de propagation dans le cas d'un MR et d'un MIR en nombre d'onde, on constate que le MR permet une estimation légèrement meilleure de ces paramètres lorsque la vitesse de propagation est faible et semble donc plus adapté. Néanmoins, cet apport est largement contrebalancé pour les fortes vitesses de propagation (ou, ce qui revient au même, pour les basses fréquences) où le MIR est bien meilleur que le MR, dans la détermination des paramètres de propagation. Nous avons donc choisi de mailler irrégulièrement le domaine des nombres d'onde. Sur la **Fig. 2-41**, on a représenté en rouge, l'évolution en nombre d'onde que nous avons finalement adopté pour mailler l'espace des nombres d'ondes. A titre de comparaison, nous avons également tracé en noir l'évolution de ce nombre d'onde dans le cas d'un MR.

Un autre type de maillage à considérer ici, et dont nous n'avons pas discuté est celui qui échantillonnerait de façon irrégulière le module du vecteur nombre d'onde tout en échantillonnant de façon régulière les différentes directions de propagation. Ce type de maillage évite d'introduire de

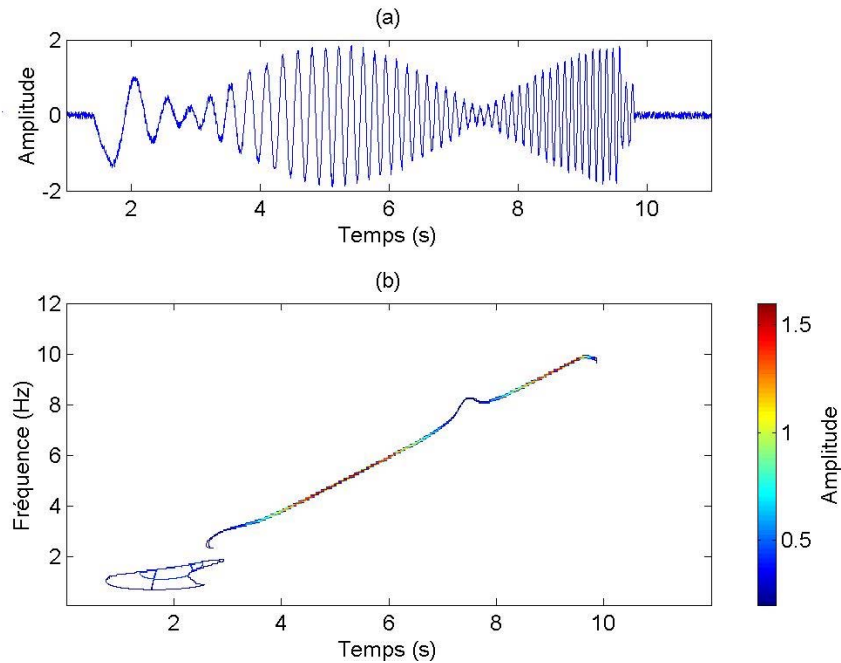
fortes erreur sur l'estimation de l'azimut lorsque les vitesses de propagation sont fortes. Cependant, à nombre de points de maillage égal, il est moins performant que le MIR que nous avons défini précédemment.



**Fig. 2-41: Evolution d'une composante du vecteur nombre d'onde lorsque l'autre composante est nulle. La courbe noire représente le cas d'un MR et la courbe rouge celui d'un MIR.**

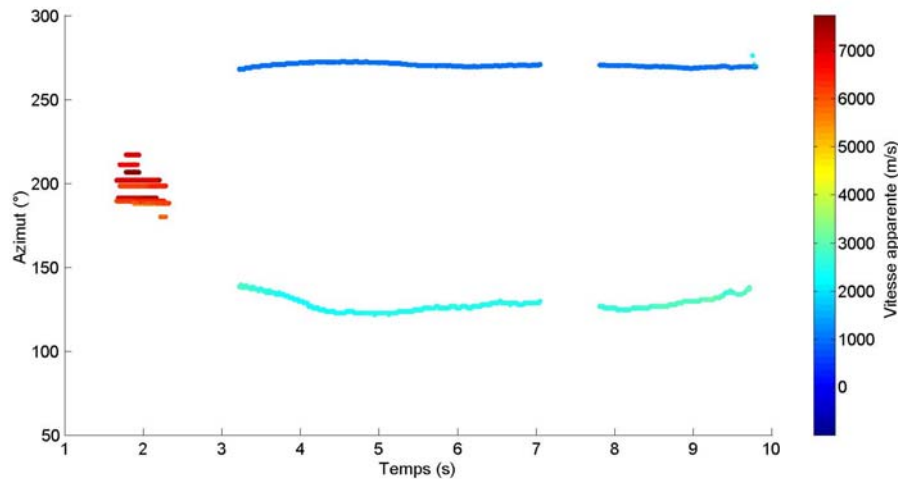
### *Le pouvoir de séparation*

Comme nous l'avons vu dans le chapitre I, le pouvoir de séparation d'une antenne est directement gouverné par sa configuration géométrique. Pour les méthodes classiques, ce pouvoir de séparation se lit dans la fonction de transfert de l'antenne puisqu'il est déterminé par la largeur à mi-hauteur de son pic central. Si deux ondes génèrent dans le domaine des nombres d'ondes des pics localisés l'un de l'autre à une distance inférieure à cette largeur, les techniques classiques seront incapables de les séparer. Dans le cas de *MUSIC*, cette loi n'est plus directement applicable et nous allons tester de façon expérimentale son pouvoir de séparation. Ce dernier dépend directement des vecteurs nombres d'ondes mis en jeu dans la propagation du champ d'onde et augmente avec le vecteur nombre d'onde. Nous avons simulé la propagation quasi-simultanée à travers l'antenne de deux modulations linéaires en fréquence. Ces deux modulations ont des paramètres de propagation constants égaux à  $(N135^\circ, 3000m/s)$  et  $(N270^\circ, 1000m/s)$ . La décomposition temps-fréquence (Fig. 2-42-(b)) du signal somme représenté sur la Fig. 2-42-(a) conduit à une ligne de crête unique sur laquelle il n'est pas possible de distinguer la présence simultanée des deux ondes.



**Fig. 2-42 : (a) Signal somme de deux modulations linéaires en fréquences qui se propagent de façon quasi-simultanée à travers l'antenne avec des paramètres de propagation différents. (b) Décomposition temps-fréquence globale associée.**

Le long de cette ligne de crête, une fenêtre temporelle glissante a été introduite et les paramètres de propagation ont été estimés. On a systématiquement introduit deux vecteurs propres dans la description du sous-espace '*signal*'. L'augmentation progressive du contenu fréquentiel du champ d'onde permet d'échantillonner l'ensemble des nombres d'ondes et de déterminer expérimentalement à partir de quelle fréquence, et donc aussi à partir de quelle différence en nombre d'onde, on est capable de séparer les deux ondes tout en évaluant correctement leurs paramètres. Les résultats de la décomposition temps-fréquence-nombre d'onde sont présentés Fig. 2-43. On voit que lorsque la fréquence est supérieure à  $3\text{Hz}$ , on est clairement en mesure de déterminer la présence des deux ondes. En terme de longueurs d'onde, si deux ondes se propagent simultanément à travers l'antenne '*Annot*' avec une différence de longueur d'onde supérieure à une centaine de mètres, nous serons en mesure de les séparer. Nous avons comparé ces résultats avec une analyse classique type '*BeamForming*' où aucune décomposition en composantes orthogonales de la matrice spectrale n'a été utilisée. Deux pics ont systématiquement été recherchés dans l'espace des nombres d'onde de manière à voir si l'ensemble des informations relatives à nos deux ondes peuvent être retrouvés.



**Fig. 2-43 : Evolution des paramètres de propagation en fonction du temps. La couleur donne une mesure de la vitesse apparente des ondes qui se propagent à travers l'antenne. Deux valeurs propres ont été utilisés pour la description du sous-espace 'signal'.**

Les résultats sont présentés sur la Fig. 2-44. D'une part, on observe également une identification de chacune des ondes au-dessus de la fréquence 3Hz. Cependant, les paramètres de propagation sont beaucoup moins bien restitués que dans le cas précédent, en particulier pour les hautes fréquences, où une seule onde est correctement identifiée. Lorsque plusieurs ondes se propagent à travers l'antenne, la décomposition en nombre d'onde du signal peut être vue comme la superposition des fonctions de transfert de l'antenne, centrées sur chacun des nombres d'ondes correspondant à chacune des ondes. Selon la valeur de ces nombres d'onde, la sommation peut créer des pics d'interférences dus à la sommation des pics secondaires présents dans la fonction de transfert. Ces pics d'interférences peuvent avoir une énergie significativement plus forte que les pics recherchés et être considérés comme des pics réels, correspondant à la propagation d'une onde à travers l'antenne. Lorsqu'on utilise *MUSIC*, nous avons vu que les pics secondaires sont très fortement atténués. Les pics d'interférences sont alors moins nombreux et surtout beaucoup moins énergétique. En théorie, la séparation par les méthodes classiques est optimale dès que la différence en nombre d'onde est supérieure à la largeur à mi-hauteur du pic centrale de la fonction de transfert. En pratique, on devine la présence des deux ondes mais leurs paramètres de propagation respectifs sont mal estimés avec les méthodes classiques.

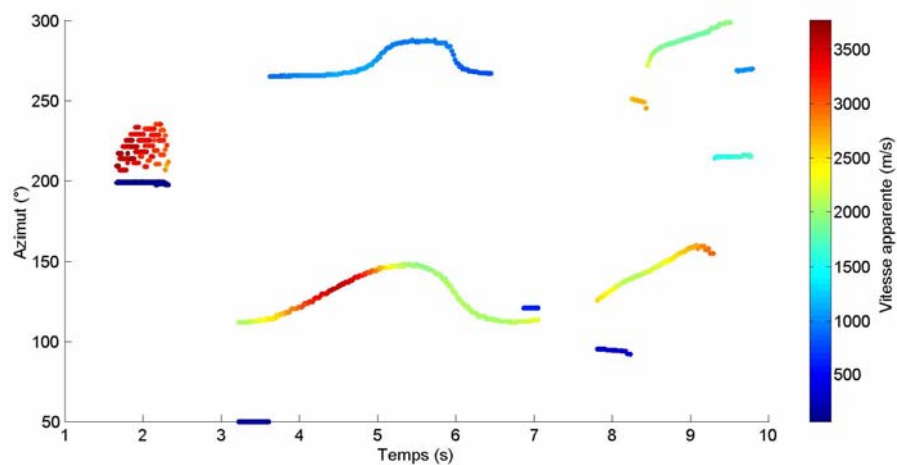


Fig. 2-44 : Evolution des paramètres de propagation en fonction du temps. La couleur donne une mesure de la vitesse apparente des ondes qui se propagent à travers l'antenne. Une méthode classique type '*retard-sommation*' a été utilisée.



## 2.4. Conclusions méthodologiques

Lorsque le milieu de propagation est fortement hétérogène, la complexité des sismogrammes augmente puisque des phases multiples, dont les caractéristiques fréquentielles et spatiales sont très proches, se propagent alors simultanément à travers l'antenne. Ceci nécessite la mise au point d'outils d'analyse, capables de séparer les différentes phases en interaction.

### *Séparation dans le domaine fréquentiel*

L'algorithme des lignes de crêtes est appliqué aux différents signaux enregistrés par l'antenne de manière à nous permettre de :

- **détecter** les phases les plus énergétiques et les plus cohérentes des sismogrammes
- **séparer** les phases de contenus fréquentiels différents, qui se propagent simultanément à travers l'antenne.
- **attribuer** un contenu **fréquentiel** à chacune de ces phases

Ces lignes de crêtes seront extraites de la transformée en ondelettes, pour permettre un pouvoir de séparation continûment adapté à la fréquence d'analyse.

Nous avons également montré que la variabilité des décompositions en lignes de crêtes des différents signaux enregistrés par l'expérience d'*Annot* nécessite d'utiliser une décomposition temps-fréquence globale, permettant de pondérer l'énergie liée à chacune des lignes de crêtes par la cohérence locale des formes d'onde à l'échelle de l'antenne.

### *Séparation dans le domaine spatial*

L'algorithme *MUSIC* a été sélectionné pour décomposer les signaux dans l'espace des nombres d'onde. Cet algorithme est basé sur la décomposition en **composantes orthogonales** de la matrice spectrale en un sous-espace '*signal*' et un sous-espace '*bruit*'.

Nous avons montré que cet algorithme permettait une **meilleure séparation** des composantes multiples **fortement corrélées** dans le domaine temporel et spatial.

L'utilisation efficace de cet algorithme de décomposition nécessite néanmoins un *a priori* sur le nombre de phases qui se propagent simultanément à travers l'antenne. Nous avons alors également proposé un processus itératif, basé sur la **reconstruction de l'énergie** contenue dans le signaux. Le nombre de vecteurs propres finalement utilisés pour décrire les deux sous-espaces est celui pour lequel la prise en compte d'un vecteur propre supplémentaire ne permet plus de reconstruire une quantité d'énergie significativement supérieure. La quantité d'énergie ainsi reconstruite par le jeu de paramètres fréquence-azimut-vitesse sera également utilisé pour

une **vérification** *a posteriori* de la validité des paramètres de propagation retrouvés par la décomposition en nombre d'onde.

### **Temps-fréquence-nombre d'onde**

La méthode de décomposition temps-fréquence-nombre d'onde que nous proposons permet donc d'**identifier**, d'**analyser** et de **caractériser** l'ensemble des phases énergétiques et cohérentes qui composent les sismogrammes enregistrés par une antenne. Les paramètres qui peuvent directement être extraits de ces décompositions sont, pour chacune des phases identifiées :

- le **temps** d'arrivée et la **durée** du phénomène ondulatoire
- la **fréquence** dominante
- la **direction** de propagation à travers l'antenne
- la **vitesse** apparente de propagation

La détermination de l'ensemble de ces paramètres est primordiale dès lors que l'on cherche à caractériser les interactions qui existent entre un champ d'onde incident et les hétérogénéités du milieu de propagation. Ils permettront alors de proposer une interprétation quant aux types d'hétérogénéités qui ont généré la propagation des différentes phases secondaires présentes dans la coda des sismogrammes.

## *CHAPITRE III*

### *APPLICATION A L'ANALYSE DE SIGNAUX SYNTHETIQUES*



### 3. Application à l'analyse de signaux synthétiques

Nous avons introduit dans le chapitre II une méthodologie haute-résolution de décomposition des sismogrammes dans l'espace temps-fréquence-nombre d'onde. Nous avons montré qu'une telle décomposition permettait de suivre l'évolution temporelle des paramètres de propagation des différentes phases se propageant à travers une antenne sismologique. Pour dessiner les limites pratiques de cette méthode, nous allons, dans ce chapitre, l'appliquer à l'analyse de signaux synthétiques.

- D'abord, nous allons tester le pouvoir de résolution de la méthode de décomposition temps-fréquence-nombre d'onde développée précédemment.

Connaissant très précisément le milieu de propagation, nous pourrions directement comparer les résultats obtenus avec ceux escomptés. Nous étudierons également comment varient ces résultats selon le nombre de vecteurs propres utilisés pour décrire le sous-espace '*signal*'.

- Ensuite, nous étudierons l'influence de la position relative des hétérogénéités par rapport à celle de l'antenne d'observation.
- Enfin, nous étudierons comment évoluent les signaux sismiques lorsque le contenu spectral de la source varie.

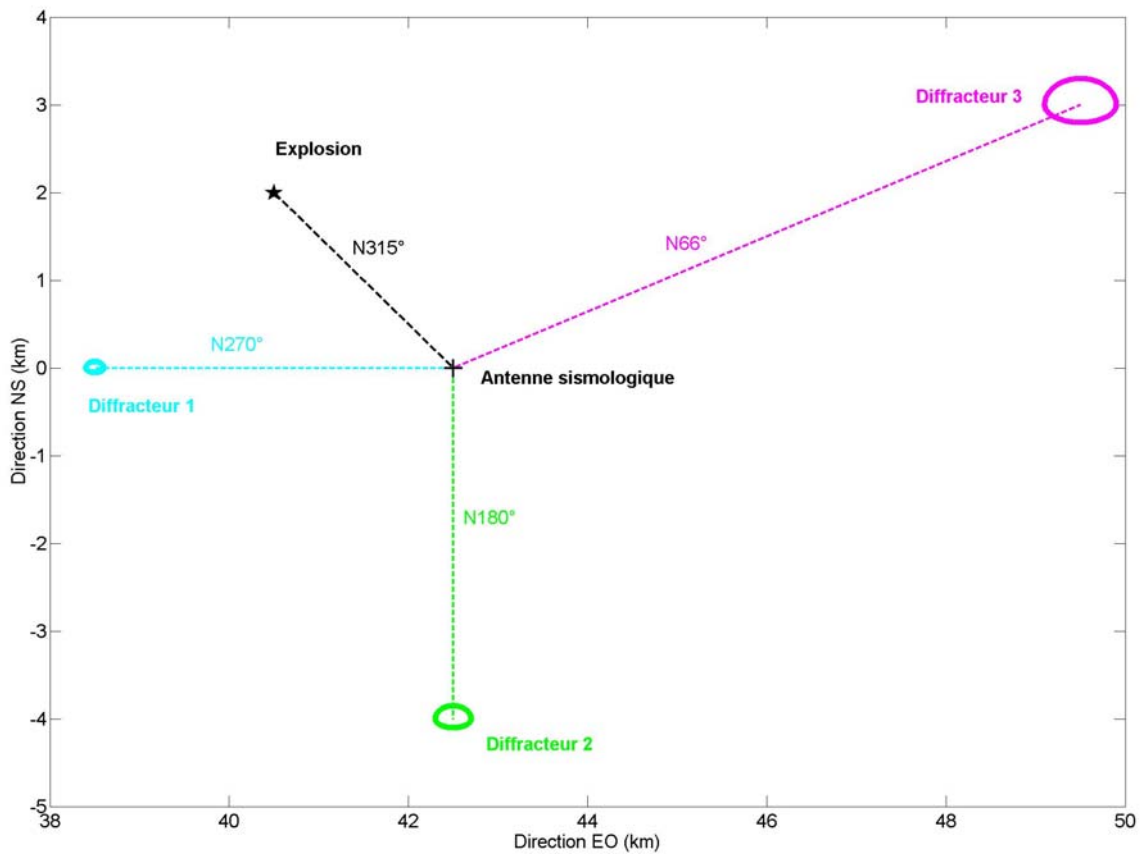
Nous pourrions ainsi évaluer le pouvoir de résolution de l'antenne sismologique lorsque la longueur d'onde du champ d'onde incident varie.

#### 3.1. Présentation des données synthétiques

##### **3.1.1. Le milieu de propagation**

La configuration du milieu de propagation est présentée sur la Fig. 3-1. Nous appellerons '*matrice*', la partie homogène du milieu de propagation et '*diffracteurs*', les hétérogénéités qui ont été introduites dans cette matrice. Dans notre modèle, les diffracteurs, de tailles différentes sont au nombre de trois. Chaque diffracteur est semi-elliptique dans le sens où les contours des parties nord et sud sont des demi-ellipses d'aplatissement différent. Cette forme particulière diffère des modèles classiquement construits, utilisant des hétérogénéités complètement symétriques tel que des diffracteurs circulaires par exemple. De plus, elle permet d'introduire des zones privilégiées qui favorisent la diffraction de l'énergie (chacun des bords des ellipses). La taille caractéristique de chacune des hétérogénéités est 800, 400 et 200 mètres. Les simulations numériques ont été réalisées dans le plan  $(x,z)$  (défini par les axes *NS* et *EO* sur la Fig. 3-1), le modèle de propagation étant

considéré infini dans la direction  $y$ . De la même manière, les diffracteurs sont supposés infinis dans la direction  $y$ . Les vitesses de propagation des ondes de compression  $P$  et de cisaillement  $S$  égalent 4 et 2.3 km/s dans la matrice. Dans la première partie de l'analyse, le contenu spectral de la source est centré sur la fréquence 5Hz. L'ensemble de ces paramètres a été choisi de manière à se placer dans un cas pour lequel la longueur d'onde du champ d'onde incident est proche de la taille caractéristique des diffracteurs, ce qui favorise les processus de diffraction. Les différentes hétérogénéités diffèrent de la matrice par un contraste de vitesse, la densité étant homogène dans l'ensemble du milieu. Les vitesses de propagation dans chacune des hétérogénéités ont été fixées à 3 et 1.4 km/s pour les vitesses des ondes  $P$  et  $S$  et sont donc inférieures à celles qui ont été fixées dans la matrice.



**Fig. 3-1 : Configuration géométrique du milieu de propagation. Les positions de la source sismique (explosion), de l'antenne (*position 1*) et de chaque diffracteur ont été représentées.**

Les caractéristiques rhéologiques et élastiques relatives au milieu de propagation sont synthétisées dans le Tableau 3-1.

	<b>Matrice</b>	<b>Diffracteur</b>
<b>Vitesse des ondes P (km/s)</b>	4.0	3.0
<b>Vitesse des ondes S (km/s)</b>	2.3	1.4
<b>Densité (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2000.0	2000.0
<b>Facteur de qualité des ondes P</b>	500.0	100.0
<b>Facteur de qualité des ondes S</b>	250.0	50.0

**Tableau 3-1 : Caractéristiques du milieu de propagation**

### **3.1.2. Méthode de calcul des sismogrammes synthétiques**

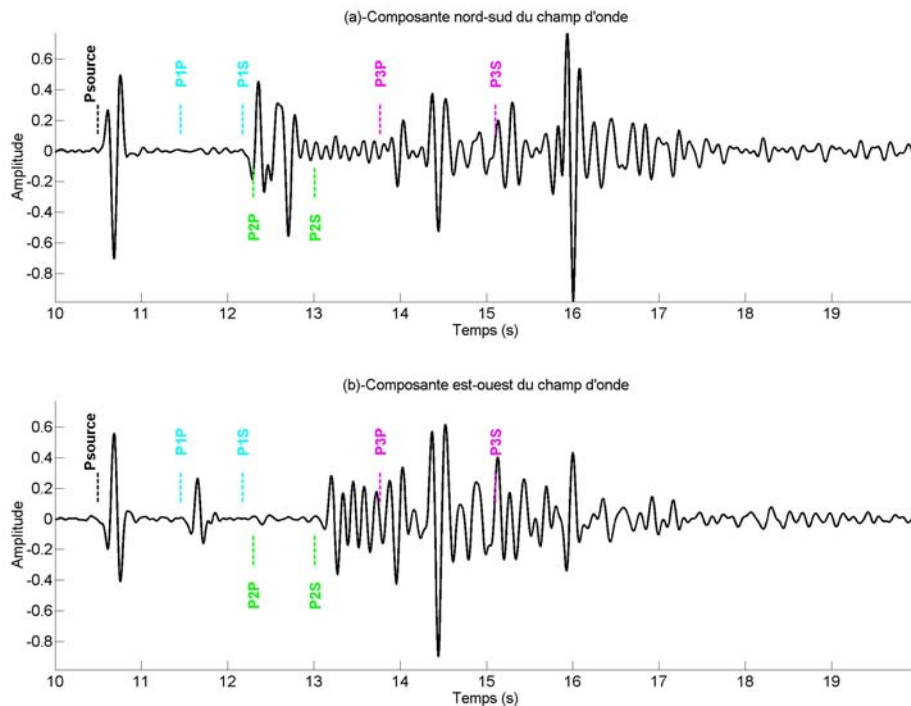
La propagation des ondes dans le milieu hétérogène a été calculée suivant une méthode indirecte d'équations intégrales aux frontières (Gaffet, 1995) où les fonctions de Green sont déterminées par la méthode des nombres d'ondes discrets (Bouchon et Aki, 1977). Ces fonctions sont calculées dans le domaine fréquentiel. Les sismogrammes synthétiques s'obtiennent par convolution des fonctions de Green ainsi calculées avec une fonction source. Cette méthode de calcul a déjà été utilisée par ailleurs pour calculer la propagation des ondes sismiques dans des milieux complexes caractérisés par des interfaces irrégulières tels que des bassins sédimentaires ou des reliefs topographiques (Gaffet, 1995 ; Gaffet et al., 2000).

Dans notre cas, le milieu de propagation est homogène, élastique, isotrope et infini. Trois hétérogénéités elliptiques y ont été introduites (Fig. 3-1). Chaque diffracteur peut alors être considéré, selon le principe de Huygens, comme une distribution de sources secondaires. Lorsqu'une perturbation sismique est introduite dans le milieu de propagation, chacune des sources secondaires va réémettre des ondes élastiques du type *P* ou *S*, une partie de l'énergie peut également se propager à l'intérieur des différentes zones hétérogènes avant d'être réémise dans la matrice homogène. La source sismique utilisée pour calculer nos signaux synthétiques est une explosion. Les ondes générées par la source formant le champ d'onde primaire, sont donc uniquement du type *P*. Le champ d'onde issu des interactions entre le champ d'onde primaire et chacune des hétérogénéités est appelé le champ d'onde diffracté.

### **3.1.3. Les signaux**

Le champ d'onde primaire ainsi que le champ d'onde diffracté par les trois hétérogénéités ont été calculés pour différents capteurs introduits dans le milieu. L'ensemble de ces capteurs constitue une antenne sismologique qui admet exactement la même configuration géométrique (9 capteurs, 250 mètres d'ouverture) que celles déployées durant l'expérience d'Annot (voir chapitres I et IV). Les

deux directions de l'espace selon lesquelles les sismogrammes synthétiques ont été calculés seront assimilées aux directions nord-sud (*NS*) et est-ouest (*EO*). La Fig. 3-2 représente les composantes *NS* et *EO* du signal, calculées pour un des capteurs de l'antenne sismologique.



**Fig. 3-2 : Signaux synthétiques correspondant aux composantes *NS* et *EO*, calculés pour un des capteurs de l'antenne sismologique.**

Lorsque le champ d'onde incident se propage à travers le milieu de propagation, il interagit avec les différentes hétérogénéités. Les phases diffractées résultant de ces interactions se propagent alors depuis chacune des hétérogénéités jusqu'à l'antenne. Des conversions du type *P-S* peuvent accompagner la diffraction et par conséquent, les phases diffractées se propagent à travers l'antenne avec une vitesse de propagation qui est celle des ondes *P* ou *S*. Les temps théoriques associés à chacune des phases diffractées principales et attendues ont été calculés et superposés au signal enregistré dans chacune des directions de l'espace (Fig. 3-2). La dénomination *PIP* signifie par exemple une propagation en onde *P* depuis la source jusqu'au diffracteur noté *I* sur la Fig. 3-1 et en onde *P* également depuis ce même diffracteur jusqu'à l'antenne sismologique. *PIS* diffère de *PIP* par son trajet en onde *S*, depuis le diffracteur jusqu'à l'antenne sismologique.

Le temps d'arrivée du champ d'onde primaire, correspondant à la propagation de la perturbation induite par l'explosion est noté *Psource* sur la Fig. 3-2. Dans ce cas, la contribution de la source sismique se propage uniquement sous forme d'onde du type *P* puisque c'est une explosion qui a été générée dans le milieu. Concernant les différentes hétérogénéités, les directions de propagation théoriques moyennes de l'énergie, vues depuis l'antenne sont (voir Fig. 3-1)  $N270^\circ$  (diffracteur 1),



N180° (diffracteur 2) et N66° (diffracteur 3), respectivement. La position des diffracteurs par rapport à l'antenne sismologique implique la présence des phases du type *P1S* et *P2P* uniquement sur les composantes *NS* alors que les phases du type *P1P* et *P2S* n'apporteront leurs contributions que sur les composantes *EO*. Les vitesses apparentes de propagation qui sont, dans un cas plan, également les vitesses réelles de propagation de l'énergie à travers l'antenne devraient être égales à 4 km/s pour les ondes *P* et 2.3 km/s pour les ondes *S*.

Le milieu de propagation choisi ne contient que trois hétérogénéités et constitue donc, à priori, un milieu de propagation simple. Nous voyons que, malgré cette simplicité, les signaux synthétiques résultants sont complexes. Les hétérogénéités que nous avons placées dans le milieu de propagation ne sont pas de simples points diffractants mais présentent une étendue spatiale. L'énergie sismique peut donc se propager à l'intérieur ou à l'interface de ces diffracteurs, qui peuvent renvoyer simultanément de l'énergie sur une longue durée et ainsi augmenter considérablement la complexité des sismogrammes. Par exemple, sur la composante *EO* présentée sur la Fig. 3-2-(b), on voit que le champ d'onde diffracté par l'hétérogénéité 2 en onde *S* n'est pas simplement caractérisé par une phase isolée qui serait une simple réplique plus ou moins dégradée de la fonction source. Son étalement temporel témoigne d'interactions complexes entre le champ d'onde primaire et cette hétérogénéité.

La phase *P3P* est suivie, autour de 14.5sec., d'une phase d'amplitude supérieure. Son temps d'arrivée est compatible avec celui d'une phase qui serait réémise en direction de l'antenne, après s'être propagée à l'interface de l'hétérogénéité 3 avec une vitesse de propagation égale à 4km/s. Deux phases de ce type, se propageant à l'interface de l'hétérogénéité 3, dans des sens de propagation opposés, réémettent de l'énergie dans la direction de l'antenne quasi-simultanément et expliqueraient la forte amplitude de l'arrivée localisée autour de 14.5sec.. Le même type de processus peut être invoqué pour l'arrivée énergétique qui suit la phase diffractée *P3S*, autour de 16sec.. La différence de temps de propagation entre cette deuxième phase amplifiée et la phase *P3S* est alors compatible avec une onde d'interface se propageant avec une vitesse de propagation qui serait celle des ondes *S* dans le milieu.

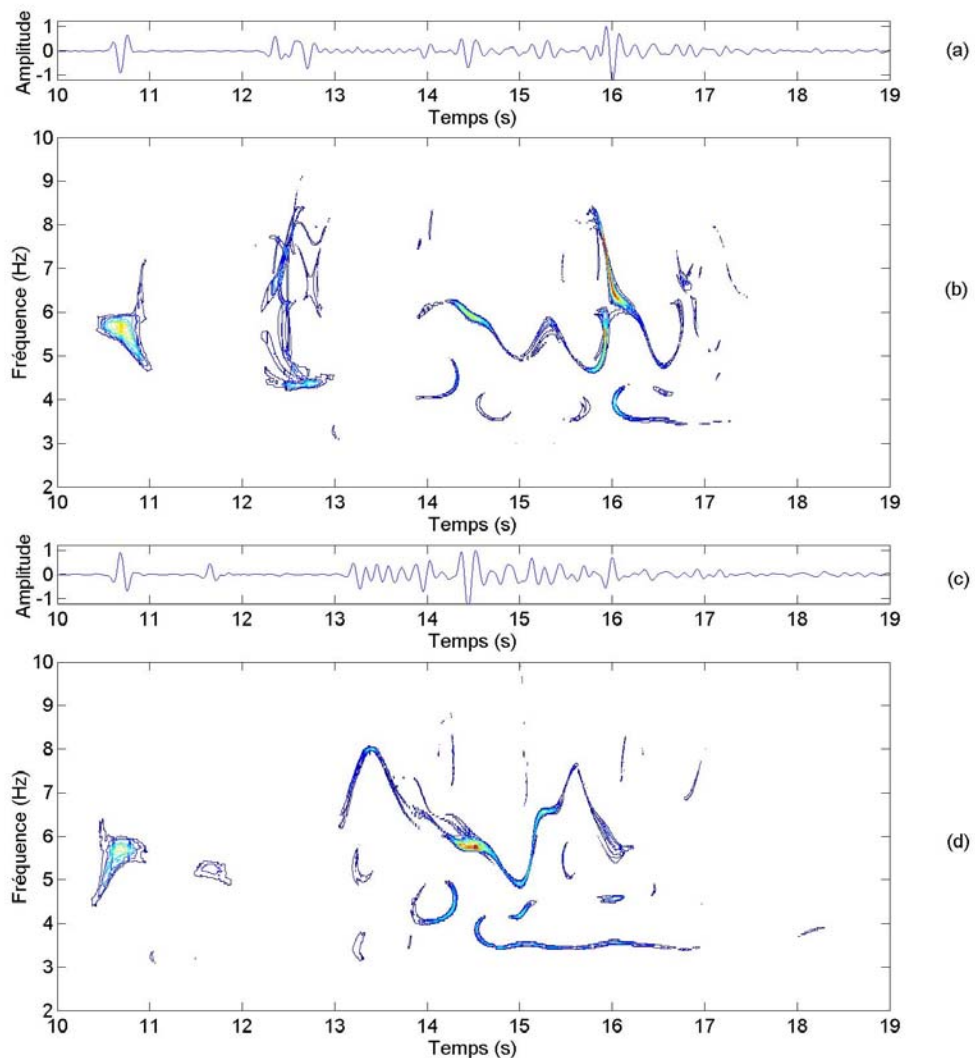
Une deuxième hypothèse permettant d'expliquer ces deux arrivées d'amplitudes supérieures aux phases *P3P* et *P3S*, serait de considérer que les ondes primaires se sont propagées à l'intérieur de l'hétérogénéité 3, avant d'être réémises vers l'antenne. Plusieurs points diffractants réémettent alors de l'énergie, qui par interférences constructives, génèrent la propagation de phase d'amplitude supérieure aux phases *P3P* et *P3S*.

Au fur et à mesure que le temps s'écoule, les composantes ondulatoires qui se propagent simultanément à travers l'antenne devient donc de plus en plus nombreuses et complexifient notablement les signaux.

### 3.2. Résultats de l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde

Comme il a été développé dans le chapitre II, l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde se déroule en deux temps. D'abord, les signaux sont décomposés dans l'espace temps-fréquence. Pour chaque zone temps-fréquence présentant suffisamment d'énergie cohérente, une décomposition fréquence-nombre d'onde sera alors réalisée.

Les décompositions temps-fréquence globales en lignes de crêtes selon lesquelles les signaux ont été analysés dans l'espace des nombres d'ondes sont représentées sur Fig. 3-3-(b) et Fig. 3-3-(d) pour les composantes *NS* et *EO* respectivement.



**Fig. 3-3 : (a) Composante *NS* calculé pour un des capteurs de l'antenne. (b) Décomposition globale en lignes de crêtes des composantes *NS*. (c) Composante *EO* calculé pour un des capteurs de l'antenne. (d) Décomposition globale en lignes de crêtes des composantes *EO*.**

Dans ce premier cas, la fonction source avec laquelle ont été convoluées les fonctions de Green du milieu simulé est un Ricker, centré sur une fréquence de 5Hz. Le contenu spectral des différents signaux s'étale dans une bande de fréquences comprises entre 2 et 9Hz. Toutes les lignes de crêtes dont la fréquence est différente de celle de la source sont le résultat d'interférences entre des composantes multiples qui se propagent simultanément à travers l'antenne.

D'un point de vue technique, pour les raisons évoquées dans le paragraphe II.2.4, cette décomposition en lignes de crêtes a été calculée en utilisant une fenêtre fréquentielle de forme gaussienne, de largeur variable avec la fréquence d'analyse. Cette largeur est telle que  $\frac{\delta f}{f} = 0.4$ , où  $\delta f$  est la largeur à mi-hauteur de la gaussienne. D'autre part, les fréquences explorées varient entre 1 et 10Hz, avec un pas égale à 0.05Hz.

### 3.2.1. Influence du nombre de vecteurs propres

Les paramètres de propagation sont calculés pour chacune des zones suffisamment énergétiques de la décomposition temps-fréquence. Dans ce cas précis, toutes les lignes de crêtes présentant un énergie supérieure à 5% du maximum de la décomposition temps-fréquence ont été sélectionnées. La méthode de décomposition en nombre d'onde basée sur l'algorithme *MUSIC* a été utilisée. Cette méthode est entièrement décrite dans le chapitre II. Dans ce paragraphe, nous voudrions insister sur l'importance du choix du nombre de vecteurs propres pris en compte pour décrire le sous-espace '*signal*', ainsi que sur la variabilité des résultats qui en découle.

Dans un premier temps, nous avons donc analysé l'évolution des paramètres de propagation lorsque le sous-espace '*signal*' est décrit par un seul vecteur propre, puis par deux vecteurs propres et enfin par trois vecteurs propres. Nous n'avons pas cherché à décrire nos signaux par des modèles supposant la présence simultanée de plus de trois phases, à la même fréquence. Du fait de l'utilisation de fenêtres temporelles étroites et d'un nombre relativement faible de capteurs, il nous semble en effet illusoire de prétendre détecter correctement plus de trois phases distinctes dans une même fenêtre d'analyse, à une fréquence donnée.

Les résultats obtenus pour un seul, deux et trois vecteurs propres sont présentés sur la Fig. 3-4 pour les composantes *NS*. Les paramètres de propagation représentés ne sont pas ceux obtenus directement après l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde mais ceux obtenus après application d'un filtre qui évalue la stabilité temporelle et fréquentielle des azimuts et des vitesses. Dans ce cas précis, entre deux échantillons temporels et fréquentiels voisins, les variations d'azimuts ( $\Delta az$ ) et de vitesses ( $\Delta v_{app}$ ) autorisées sont larges :  $\Delta az = \pm 10^\circ$  et  $\Delta v_{app} = \pm 1000 m/s$ .

FIGURE A

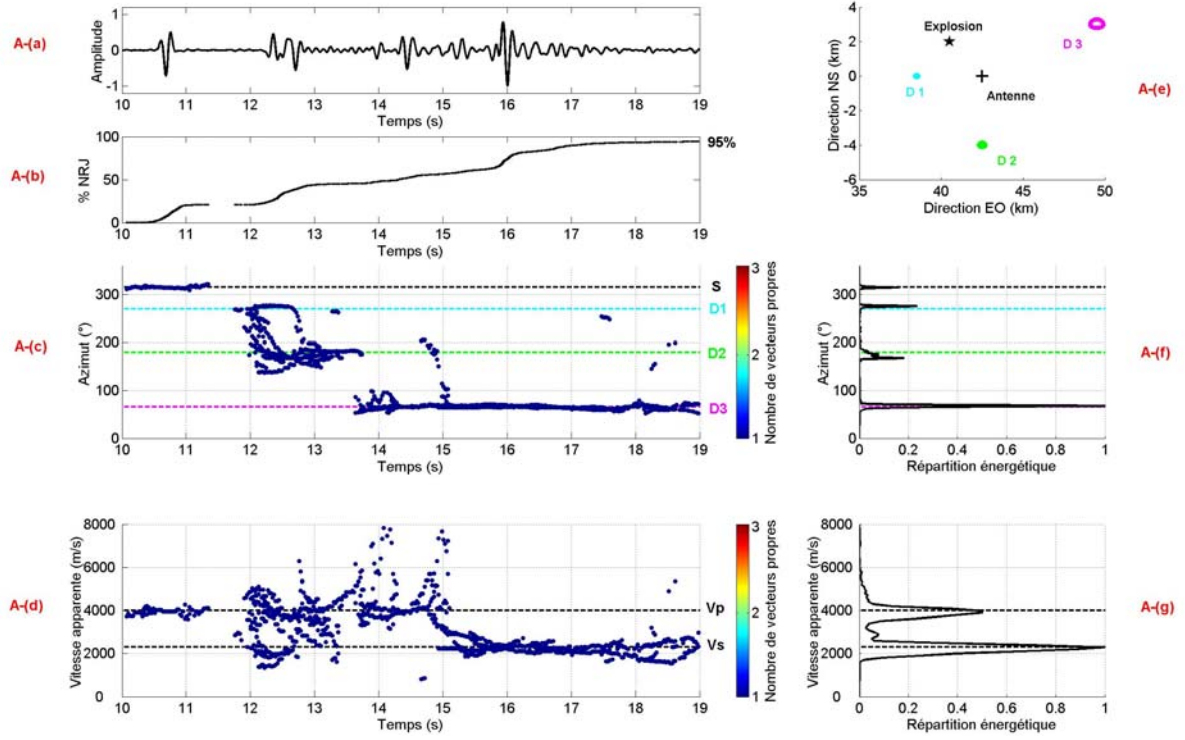


FIGURE B

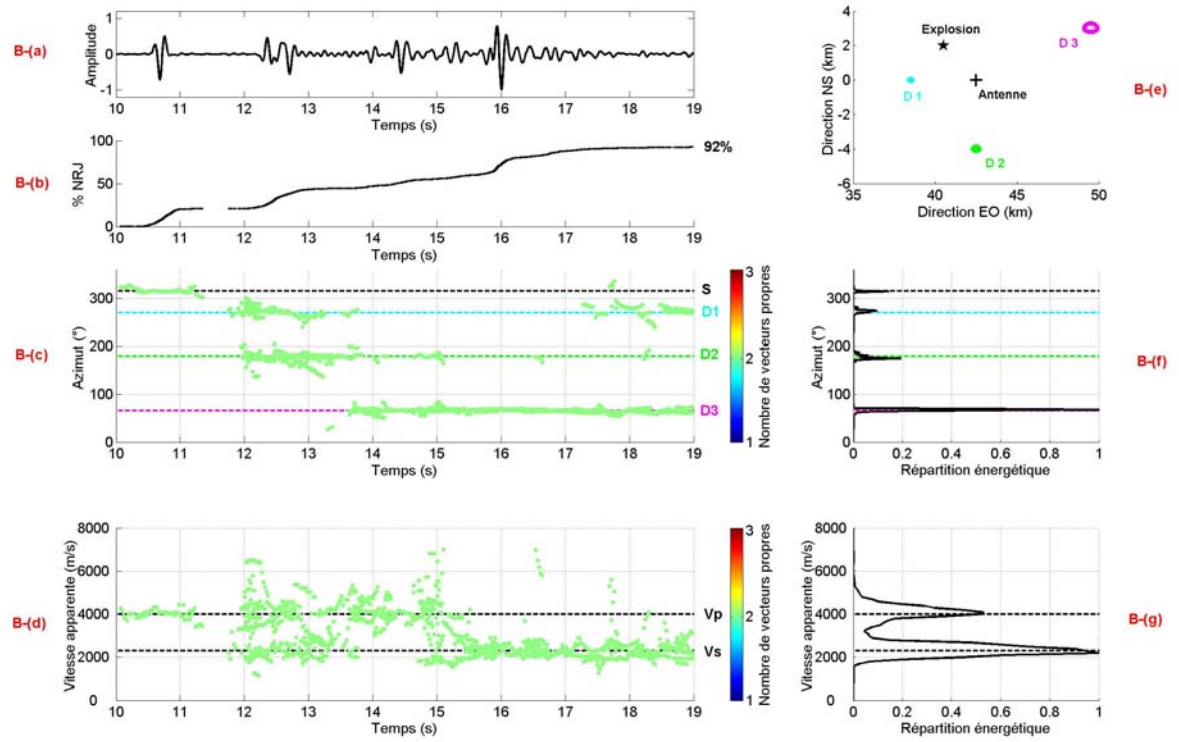
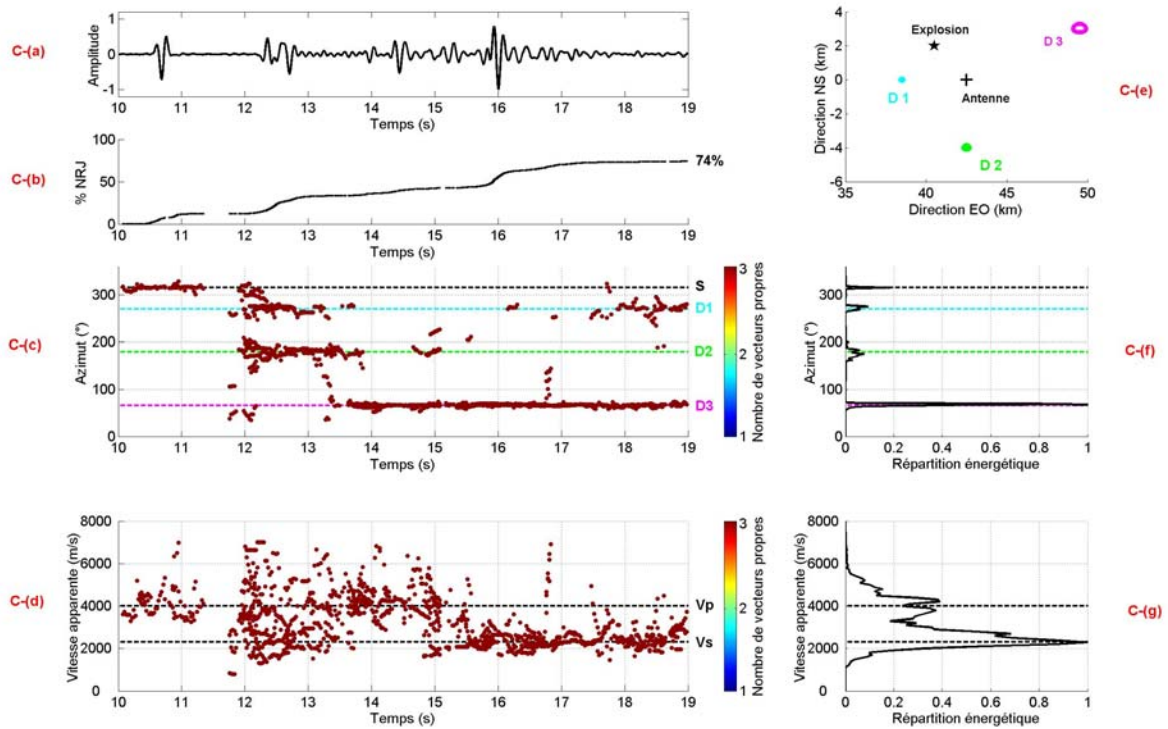


FIGURE C



**Fig. 3-4 :** Les figures A, B et C représentent les résultats de l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde lorsqu'un seul, puis deux et trois vecteurs propres sont utilisés pour décrire le sous-espace 'signal'. L'antenne se situe dans la position 1. Seules les détections présentant, entre deux échantillons voisins, une stabilité temporelle et fréquentielle telle que  $\Delta az \leq 10^\circ$  et  $\Delta v_{app} \leq 1000 \text{ m/s}$ , ont été retenues.

(a) Signal calculé pour un des capteurs de l'antenne (composante NS). (b) Evolution temporelle de la quantité d'énergie expliquée dans les signaux par rapport à l'énergie globale contenue dans la décomposition temps-fréquence en lignes de crêtes. (c) et (d) Evolution temporelle des directions et des vitesses de propagation. (e) Rappel de la configuration géométrique du milieu de propagation. (f) et (g) Distribution énergétique des directions et des vitesses apparentes de propagation, pour l'ensemble des détections présentées sur (c) et (d).

La Fig. 3-4 correspond aux résultats de l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde des composantes *NS* lorsque un seul (FIGURE A), puis deux (FIGURE B) et trois vecteurs propres (FIGURE C) sont utilisés.

Les évolutions temporelles des directions et des vitesses de propagation (*cf* graphes A-(c), A-(d), B-(c), B-(d), C-(c), C-(d)) sont représentés par une série de détectons dont la couleur représente le nombre de vecteurs propres utilisés pour décrire le sous-espace '*signal*'. Une échelle de couleur figure en face de chacun des ces graphes.

A chacune des détectons issues de l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde, on a associé une énergie. Cette énergie est aussi celle des signaux reconstruits à partir des paramètres de propagation associés à chacune des détectons (chap. II). Les distributions énergétiques des directions et des vitesses de propagation peuvent ainsi être calculées pour l'ensemble des détectons retenues par l'analyse.

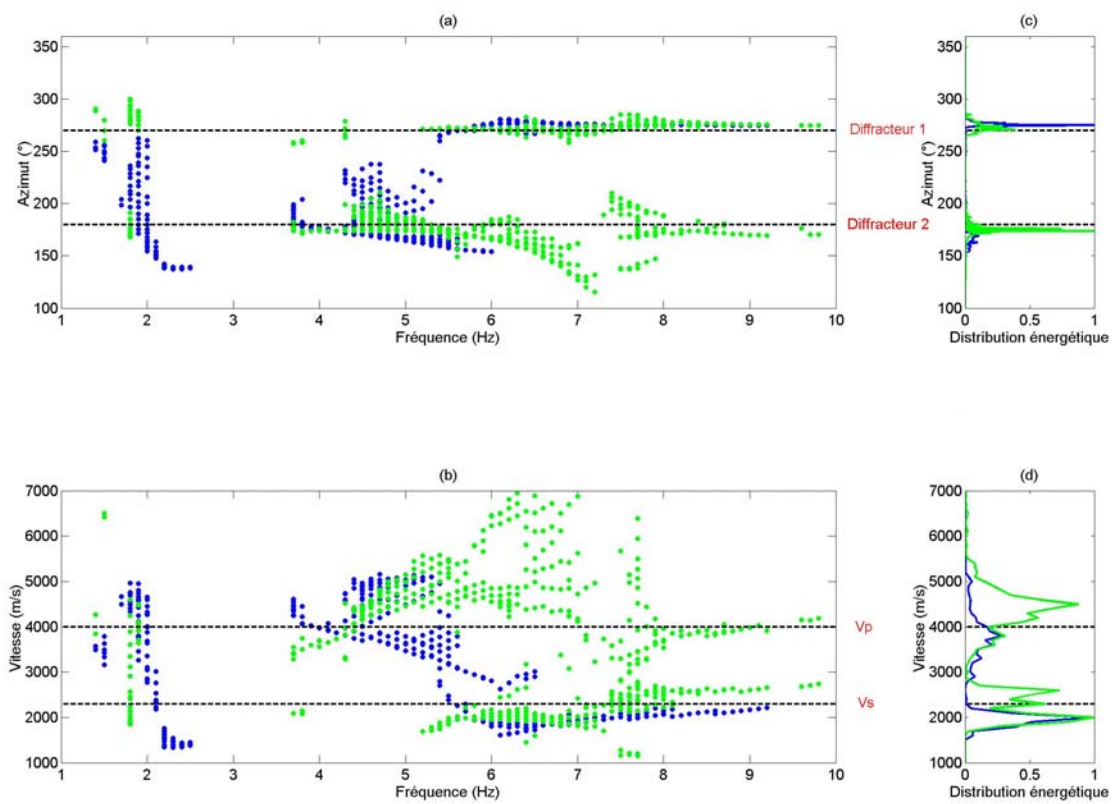
Les distributions énergétiques des directions de propagation permettent de retrouver, dans chacun des cas, les quatre directions de propagation privilégiées de l'énergie, qui sont celles selon lesquelles l'antenne voit la source sismique et les trois diffracteurs. De la même manière, les distributions énergétiques des vitesses présentent deux maximums, centrés sur les vitesses de propagation des ondes *P* et *S* introduites dans le milieu.

Sur les différentes séries temporelles représentées Fig. 3-4, on observe systématiquement une plus grande stabilité des directions de propagation en comparaison avec celle des vitesses, essentiellement lorsque des composantes multiples se propagent simultanément à travers l'antenne (entre 12 et 13sec., par exemple). La raison principale est que l'estimation de la vitesse est directement liée à celle de la fréquence. Nous avons choisi de décomposer les signaux selon leurs lignes de crêtes. La décomposition temps-fréquence attribue alors un contenu fréquentiel à chacune des composantes présentes dans le signal, matérialisé, à chaque instant temporel, par un seul point : celui qui se situe sur la ligne de crête. Or, la réalité physique est tout autre puisque le principe d'Heisenberg-Gabor stipule qu'une composante ondulatoire est toujours caractérisée par une étendue temporelle et fréquentielle. La décomposition en lignes de crêtes transgresse le principe d'Heisenberg et réduit l'étendue fréquentielle des différentes composantes ondulatoires, puisque à chaque instant, une seule fréquence est retenue par composante ondulatoire. Mais ce principe se retrouve alors dans la variabilité observée sur les vitesses de propagation. La situation se dégrade encore lorsque des composantes multiples se propagent simultanément à travers l'antenne. Entre 12 et 13sec., sur les composantes *NS*, les phases *P1S* et *P2P* se propagent simultanément à travers l'antenne (Fig. 3-2). On observe sur la décomposition temps-fréquence correspondante (Fig. 3-3-(b)), que les signaux ne sont pas caractérisés par une ligne de crête unique. Une dispersion de l'énergie est observée, due au fait que la géométrie des interférences entre les composantes multiples varie d'un capteur à un autre et génère une grande variabilité dans la position de chacune des lignes de crêtes. L'analyse pour chacune des fréquences

conduit alors à une instabilité dans la vitesse de propagation, puisque pour chaque instant temporel d'analyse, les signaux présentent une fréquence dominante différente d'un capteur à un autre.

Entre 12 et 13sec., qu'un, deux ou trois vecteurs propres soient utilisés pour construire le sous-espace '*signal*', l'évolution temporelle des directions de propagation (Fig. 3-4, graphes A-(c), B-(c) et C-(c)) permet de détecter la présence simultanée des deux phases *PIS* et *P2P* (N270° et N180°). Ces deux directions de propagation sont cependant moins clairement différenciées lorsqu'un seul vecteur propre est utilisé.

L'évolution fréquentielle des paramètres de propagation, entre 12 et 13sec., est représentée Fig. 3-5-(a) et Fig. 3-5-(b) pour les directions et les vitesses de propagation respectivement. En bleu, on a représenté les détections correspondant au cas où un seul vecteur propre est utilisé et en vert, celles correspondant à l'utilisation de deux vecteurs propres. Tout d'abord, on observe que pour les basses fréquences (<3Hz), la présence simultanée des deux phases est difficile à détecter. A plus haute fréquence et lorsqu'un seul vecteur propre a été introduit dans le sous-espace '*signal*', on constate que l'on sépare les deux phases distinctes parce qu'elles sont présentes dans des gammes de fréquences différentes. En dessous de 5.5Hz, la phase *P2P* domine alors qu'au-dessus de 5.5Hz, c'est la phase *PIS* qui est principalement présente. La séparation des deux composantes se fait donc déjà lors de la décomposition temps-fréquence et non pas uniquement lors de la décomposition dans l'espace des nombres d'onde. Lorsque deux vecteurs propres sont utilisés (résultats en vert), la situation est différente. Cette fois-ci, on détecte la présence des deux phases sur l'ensemble de la gamme de fréquences étudiées, entre 3 et 9Hz. La séparation des deux phases se fait alors maintenant aussi lors de la décomposition en nombres d'onde des signaux. Les deux phases sont donc simultanément présentes dans toute la gamme de fréquences étudiée. Lorsqu'un seul vecteur propre est utilisé, on ne détecte que la phase dominante à chaque fréquence. La prise en compte d'un seul vecteur propre peut donc conduire à une sous-estimation de l'énergie diffractée, liée à la non-prise en compte des diverses composantes ondulatoires présentes dans le signal. On montre effectivement, à partir des distributions énergétiques des directions (Fig. 3-5-(c)) et des vitesses de propagation (Fig. 3-5-(d)), que lorsque le sous-espace '*signal*' est construit avec un ou deux vecteurs propres, l'énergie associée à chacune des hétérogénéités diffère très largement.



**Fig. 3-5 : (a) et (b) Evolution fréquentielle des directions et des vitesses de propagation entre 12 et 12.6 sec. Les détections en bleu correspondent au cas où un seul vecteur propre est utilisé et celles en vert,**



**au cas où deux vecteurs propres sont utilisés. Les pointillés noirs rappellent les paramètres théoriques de propagation que l'on cherche à extraire des signaux. (c) et (d) Distribution énergétique des directions et des vitesses de propagation.**

Cependant, la prise en compte d'un deuxième vecteur propre dans la décomposition en nombre d'onde s'accompagne également d'une augmentation dans la dispersion des paramètres de propagation. Ce point sera discuté ci-dessous, dans le paragraphe '*Discussion*'.

La coda relative à l'hétérogénéité 1 (la plus petite des hétérogénéités introduites dans le milieu, Fig. 3-1) a une durée avoisinant 2 secondes lorsqu'on utilise deux ou trois vecteurs propres, alors que cette coda n'est que très peu présente lorsqu'un seul vecteur propre est utilisé. Des phases diffractées par cette hétérogénéité semblent également se propager à travers l'antenne vers la fin du signal, entre 17 et 19sec.. Très probablement s'agit-il d'artefacts de calcul dus aux repliements de l'espace introduit lors de la simulation numérique des sismogrammes. Néanmoins, les diffractions multiples du champ d'onde ont été prises en compte dans le calcul du champ d'onde diffracté de telle façon que des phases du type *P3PIS* ou *P3SIS* (dont le trajet serait source-hétérogénéité3-hétérogénéité2-antenne) peuvent se propager à travers l'antenne. Ce type de phase pourrait également expliquer les arrivées d'énergie très tardives dans la direction de l'hétérogénéité 2, entre 17et 19sec.. Le temps de propagation de la phase *P3PIS* est égal à 17.95sec., ce qui coïncident avec le temps d'arrivée des phases observées.

A partir de 14sec., et ceci jusqu'à la fin du signal, les phases diffractées par l'hétérogénéité 3 dominant très largement le signal. On enregistre d'abord le champ d'onde diffracté en onde *P* suivi de celui diffracté en onde *S*. Lorsque un seul vecteur propre est utilisé pour décrire le sous-espace '*signal*', on passe de façon continue du champ d'onde *P* au champ d'onde *S*. Lorsque deux vecteurs propres sont utilisés, cette même transition est observée. Cependant, elle s'accompagne également de détections correspondant à la présence simultanée des phases *P3P* et *P3S*. Là encore, suivant la fréquence d'analyse, soit la séparation des deux phases simultanées sera possible, soit les interférences seront trop fortes et une vitesse intermédiaire entre celle des ondes *P* et des ondes *S* sera retrouvée.

Au même instant (15sec.), on met en évidence des arrivées secondaires diffractées par l'hétérogénéité 2. Ces détections sont également présentes lorsque un seul vecteur propre est utilisé mais sont caractérisées par une durée temporelle plus grande lorsque deux ou trois vecteurs propres sont utilisés.

## Discussion

L'ajout d'un deuxième vecteur propre dans la description du sous-espace '*signal*' a permis d'introduire des complexités supplémentaires au modèle utilisé pour décrire les signaux. La décomposition en nombre d'onde permet alors de retrouver des jeux de paramètres de propagation multiples pour les ondes présentes dans une même fenêtre d'analyse, à la même fréquence. Nous avons montré que dans certains cas, la présence de plusieurs phases simultanées sont mises en évidence et la prise en compte de plus d'un vecteur propre est efficace.

Dans d'autres cas, lorsque ces paramètres deviennent trop proches, les interférences entre les composantes multiples enregistrées par les différents capteurs de l'antenne peuvent malgré tout introduire de forts biais dans l'estimation des différents jeux de paramètres, qui peuvent alors différer de ceux qui gouvernent réellement la propagation des différentes phases. Ces biais sont mis en évidence lorsque l'on compare les distributions énergétiques des vitesses de propagation obtenues avec un seul, deux puis trois vecteurs propres respectivement (Fig. 3-4, graphes A-(g), B-(g), C-(g)). Dans les trois cas, les distributions sont caractérisées par deux pics, qui se positionnent sur les vitesses théoriques de propagation. Cependant, au fur et à mesure que l'on utilise un vecteur propre supplémentaire, la largeur de ces pics augmente, témoignant d'une dispersion croissante des vitesses de propagation autour des vitesses théoriques. Cette dispersion prouve que plus d'une composante est présente dans la fenêtre d'analyse, mais dans certains cas, leurs paramètres de propagation sont trop voisins pour que la séparation en nombre d'onde ait pu être efficace.

Du cas décrit par un seul vecteur propre au cas où deux vecteurs propres sont utilisés, on s'attend intuitivement à augmenter considérablement l'énergie globalement expliquée dans le signal. La quantité d'énergie expliquée par l'ensemble des détections (azimuts, vitesses) retenues a été comparée à l'énergie globalement portée par les lignes de crêtes (Fig. 3-4, graphes A-(b), B-(b), C-(b)). On observe que lorsque l'on utilise un vecteur propre supplémentaire, l'énergie globalement expliquée dans les signaux diminue, depuis 95% lorsqu'un vecteur propre unique est utilisé à 74% lorsque trois vecteurs propres sont utilisés. En effet, l'ajout d'un vecteur propre supplémentaire conduit à une plus grande dispersion des paramètres de propagation, ce qui implique que un nombre de détections plus faible (et donc un taux d'énergie plus faible) soit retenu par l'algorithme qui évalue la stabilité temporelle et fréquentielle des paramètres de propagation. De plus, lorsqu'un vecteur propre supplémentaire est utilisé, le biais introduit sur l'estimation des paramètres de propagation rend moins efficace la reconstruction d'énergie, et donc diminue l'énergie associée à chacune des phases détectées par l'analyse en nombre d'onde.

Les distributions énergétiques des paramètres de propagation permettent d'observer que lorsque l'on utilise deux vecteurs propres plutôt qu'un seul vecteur propre, l'énergie associée aux diffractions générées par l'hétérogénéité 2 a sensiblement augmenté alors que celle associée à l'hétérogénéité 1 a largement diminué (Fig. 3-4, graphes A-(f), B-(f)). Ainsi, nous avons montré que lorsque l'on rajoute

un vecteur propre supplémentaire dans la construction du sous-espace ‘*signal*’ (Fig. 3-5-(a) et (b)), les paramètres de propagation peuvent présenter un biais plus important que celui obtenu pour un seul vecteur propre. Le cas où une seule phase est détectée avec des paramètres de propagation proches des paramètres réels est alors plus efficace dans la reconstruction d’énergie que le cas où deux phases sont détectées avec des paramètres de propagation présentant un fort biais. Cette dernière caractéristique est encore plus marquée lorsque trois vecteurs propres sont utilisés où on observe que les énergies relatives aux diffractions générées par l’hétérogénéité 1 et 2 sont alors devenues encore plus faibles.

L’utilisateur de la décomposition en nombre d’onde se trouve toujours entre deux extrêmes :

- (1) déterminer la présence d’un maximum de phases dans le signal, en acceptant que leurs paramètres de propagation s’éloignent des paramètres réels de la propagation
- (2) ne pas chercher obligatoirement à détecter toutes les phases qui se propagent à travers l’antenne mais être attentifs à la validité des paramètres retrouvés.

La détection à outrance (*ie* augmentation du nombre de vecteurs propres) étant dangereuse car elle conduit à des résultats biaisés, voire erronés, nous chercherons systématiquement un compromis entre détection maximale et estimation optimale des paramètres de propagation. Pour ce faire, il faut apporter une contrainte supplémentaire à l’analyse, basée sur l’énergie expliquée. Dans une fenêtre temporelle donnée, et pour une certaine valeur de la fréquence, nous chercherons à déterminer les paramètres de propagation d’un maximum de phases se propageant à travers l’antenne tout en prenant le soin de vérifier que les phases ainsi caractérisées expliquent au mieux l’énergie présente dans la fenêtre d’observation. Ainsi parfois, nous serons donc amenés à ne considérer la propagation que d’une phase unique dès lors que nous aurons remarqué que cette dernière explique plus d’énergie que les phases déterminées avec plus d’un vecteur propre pour décrire le sous-espace ‘*signal*’,

Nous nous servons du critère du **maximum d’énergie expliquée** que nous avons introduit dans le paragraphe ‘*Détermination du nombre de sources*’, au chapitre II, pour **décider de l’apport** d’un vecteur propre **supplémentaire** dans la description du sous-espace ‘*signal*’.

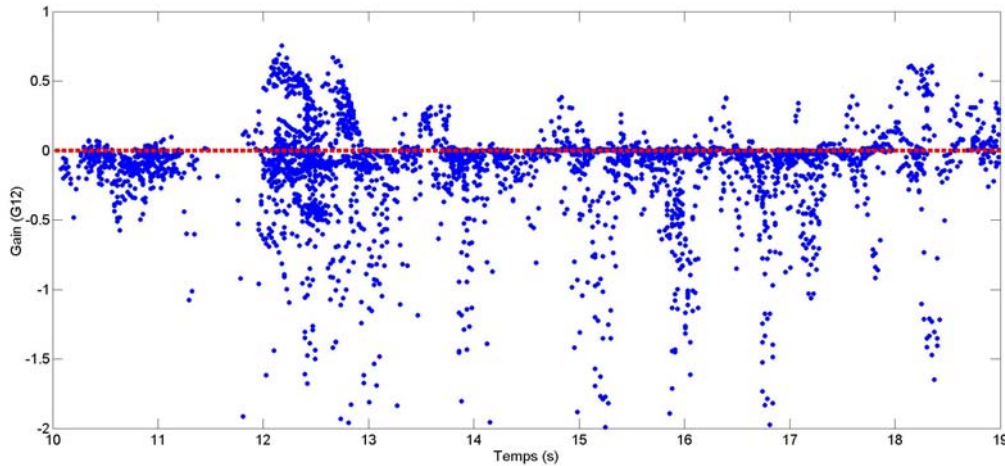
Nous avons introduit dans le chapitre II, la notion de Gain qui mesure l’augmentation de l’énergie reconstruite lorsque l’on introduit un vecteur propre supplémentaire dans le sous-espace ‘*signal*’. De la même manière, on peut mesurer le pourcentage de diminution de l’erreur de reconstruction des signaux lorsque lorsqu’un vecteur propre supplémentaire est utilisé. L’Éq. 3-1 définit l’estimation du gain lorsqu’on passe du cas où un vecteur propre est utilisé au cas où deux vecteurs propres sont utilisés.

$$G_{12} = 1 - \frac{RMS_2}{RMS_1}$$

**Éq. 3-1**

où  $RMS_1$  est la différence entre les signaux reconstruits avec un seul vecteur propre et les signaux analysés et  $RMS_2$  la différence entre les signaux reconstruits avec deux vecteurs propres et les signaux analysés.

Nous avons représenté sur la Fig. 3-6, pour chacune des détections réalisées par l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde, le Gain  $G_{12}$  défini par l'Éq. 3-1. Ce Gain est celui calculé dans le cas de l'analyse des composantes  $NS$  décrite précédemment.



**Fig. 3-6 : Evolution temporelle du gain lorsque l'on passe du cas où un seul vecteur propre est utilisé au cas où deux vecteurs propres sont utilisés pour décrire le sous-espace 'signal'.**

Lorsque le gain est supérieur à 0, cela indique que les signaux sont mieux reconstruits lorsqu'on utilise deux vecteurs propres plutôt qu'un seul vecteur propre. Lorsque le gain est inférieur à 0, un seul vecteur propre suffit et l'utilisation de deux vecteurs propres dégraderait la reconstruction. Dans le cas présenté, pour chaque point représenté correspond à une zone temps-fréquence de la décomposition globale en lignes de crêtes. Pour chacune des zones analysées, ce critère nous permettra de décider du nombre de vecteurs propres à utiliser.

D'une façon générale, on observe que le gain est fréquemment négatif. Localement, on observe des augmentations du gain, qui signifie que les signaux analysés autour de certaines zones temps-fréquence sont mieux expliqués en utilisant deux vecteurs propres. Ainsi entre 12 et 13sec., le fait d'introduire un deuxième vecteur propre dans la description du sous-espace 'signal' permet d'expliquer un taux d'énergie supplémentaire qui peut dépasser 50% de l'énergie que permet d'expliquer l'utilisation d'un seul vecteur propre. L'évolution du gain est alors un bon estimateur du nombre de phases présentes simultanément dans la fenêtre d'analyse.

Une quantité similaire ( $G_{23}$ ) peut être définie pour évaluer l'apport en terme d'explication d'énergie lorsque l'on passe du cas où deux vecteurs propres sont utilisés au cas où trois vecteurs propres sont utilisés.

Nous avons alors appliqué ce critère de sélection pour déterminer si un, deux ou trois vecteurs propres doivent être introduit dans le sous-espace '*signal*'. On sélectionne deux (respectivement trois) vecteurs propres lorsque le gain  $G_{12}$  (respectivement  $G_{23}$ ) est supérieur à 1%. Pour ces signaux synthétiques, le seuil au-dessus duquel deux (respectivement trois) vecteurs propres doivent être utilisés est faible, ce qui se justifie par un rapport signal sur bruit quasiment infini. Lors de l'analyse des signaux réels, nous verrons la nécessité d'augmenter la valeur de ce seuil.

Les résultats de l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde utilisant le critère introduit ci-dessus sont présentés sur la Fig. 3-7. Les paramètres  $\Delta az$  et  $\Delta vapp$  ont été réduit à  $\pm 1^\circ$  et  $\pm 200m/s$  de manière à ne garder que les détections les plus stables. Les Fig. 3-7-(A), (B) et (C) présentent les résultats lorsque un, deux et trois vecteurs propres ont été utilisés, pour les nouveaux paramètres  $\Delta az$  et  $\Delta vapp$ . La Fig. 3-7-(D) présente les résultats lorsque le critère du maximum d'énergie a été utilisé. La couleur associée à chacune des détections indique si un, deux ou trois vecteurs propres sont utilisés.

Très peu de détections ont été calculées en utilisant trois vecteurs propres. Autour de 15sec., on observe que le critère du maximum d'énergie expliquée conduit à n'utiliser qu'un seul vecteur propre lorsque les phases *P3P* et *P3S* n'ont pas été séparées, alors qu'il permet bien d'utiliser deux vecteurs propres lorsque ces deux phases sont séparables dans le domaine des nombres d'onde.

Concernant l'énergie liée au champ d'onde incident ainsi que celle liée à la diffraction sur l'hétérogénéité 3, elle reste globalement inchangée quel que soit le nombre de vecteurs propres introduits dans le sous-espace '*signal*'. Les énergies des phases diffractées par les hétérogénéités 1 et 2 prennent des valeurs intermédiaires entre le cas où un seul vecteur propre est utilisé et celui où deux vecteurs propres sont utilisés.

On observe également, autour de certains échantillons temporels (peu après 16 sec., par exemple), que deux vecteurs propres sont utilisés, alors qu'une seule détection a été retenue. Ceci peut s'expliquer par deux raisons :

- soit deux vecteurs propres ont effectivement été introduits dans le sous-espace '*signal*', mais lors de la décomposition en nombre d'onde et de la recherche des maxima d'énergie dans cet espace, un seul maximum a été sélectionné, le deuxième étant d'énergie trop faible.
- soit deux maxima ont été sélectionnés dans l'espace des nombres d'onde, tous deux d'énergies suffisamment élevées, formant ainsi deux jeux de paramètres de propagation, mais un seul jeu de paramètre a été retenu lors de l'évaluation de la stabilité temporelle et fréquentielle de l'ensemble des détections.

FIGURE A / COMPOSANTES NS

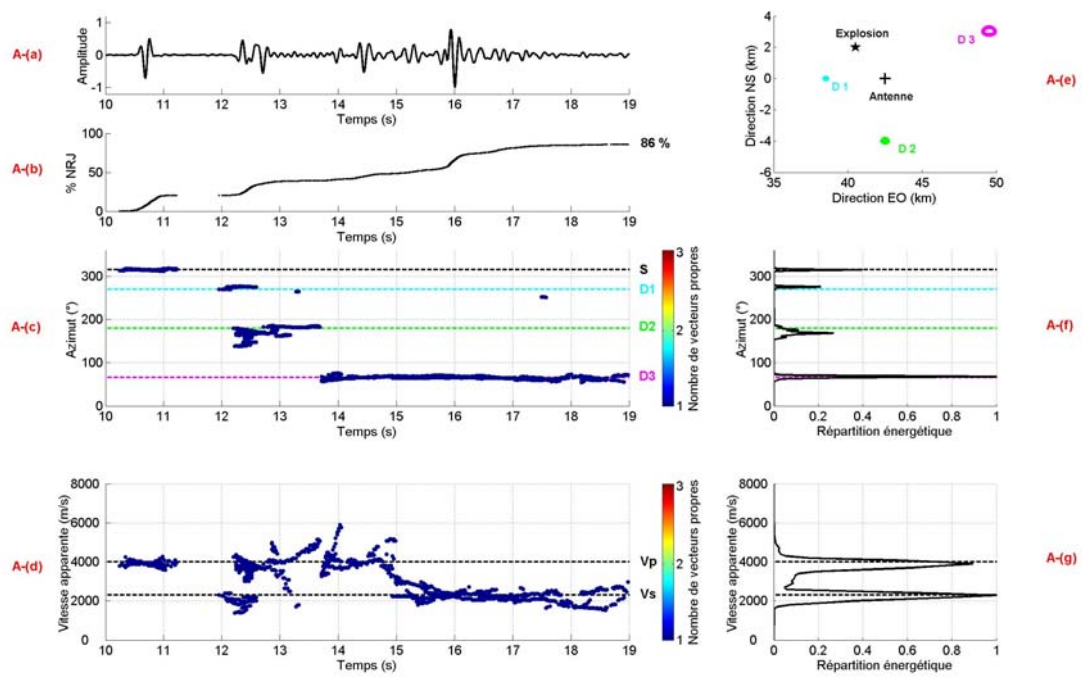


FIGURE B / COMPOSANTES NS

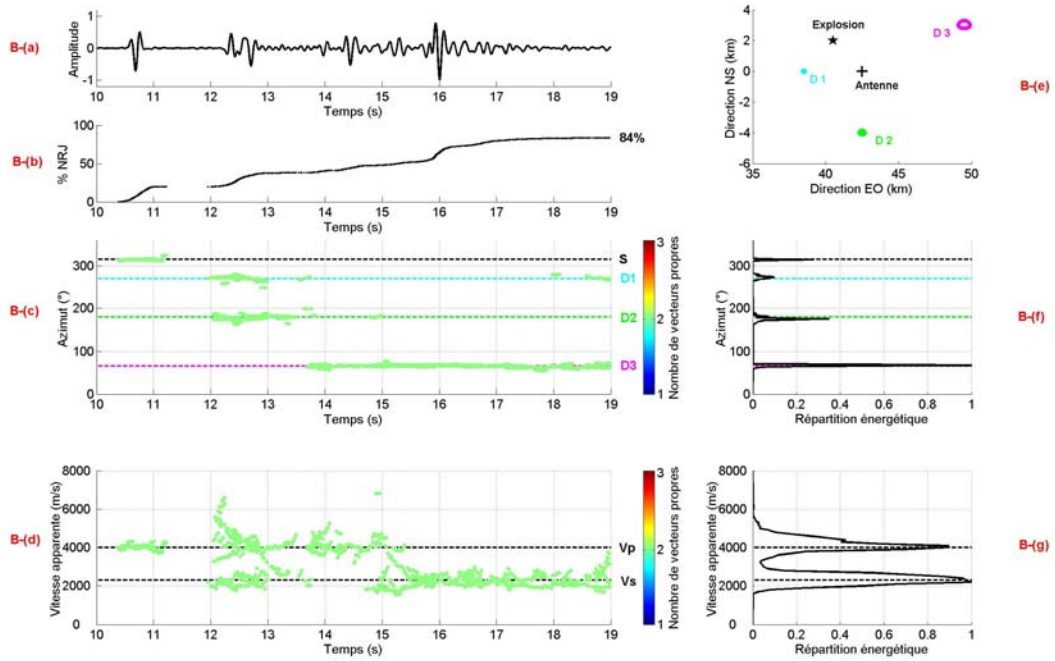


Fig. 3-7 : Les figures A, B et C représentent les résultats de l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde pour les composantes NS lorsqu'un seul, puis deux et trois vecteurs propres sont utilisés pour décrire le sous-espace 'signal'. L'antenne se situe dans la position 1. Seules les détections présentant une stabilité temporelle et fréquentielle telle que  $\Delta az \leq 1^\circ$  et  $\Delta vapp \leq 200 \text{ m/s}$  ont été retenues. (voir suite légende page suivante)

FIGURE C / COMPOSANTES NS

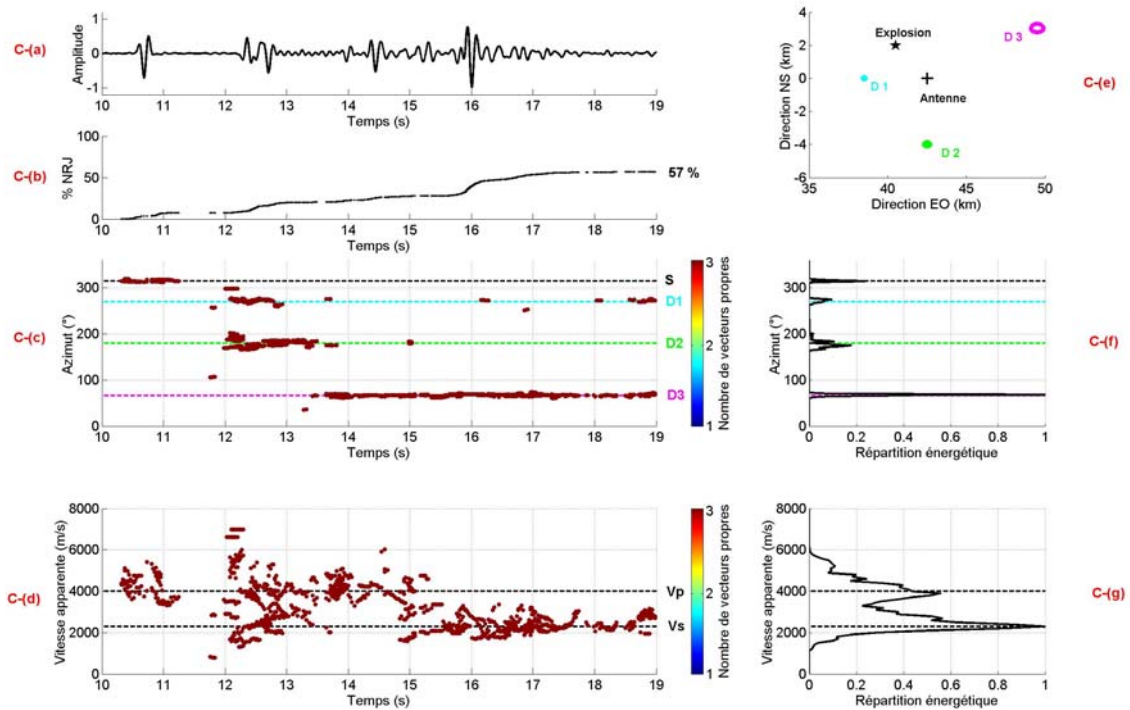
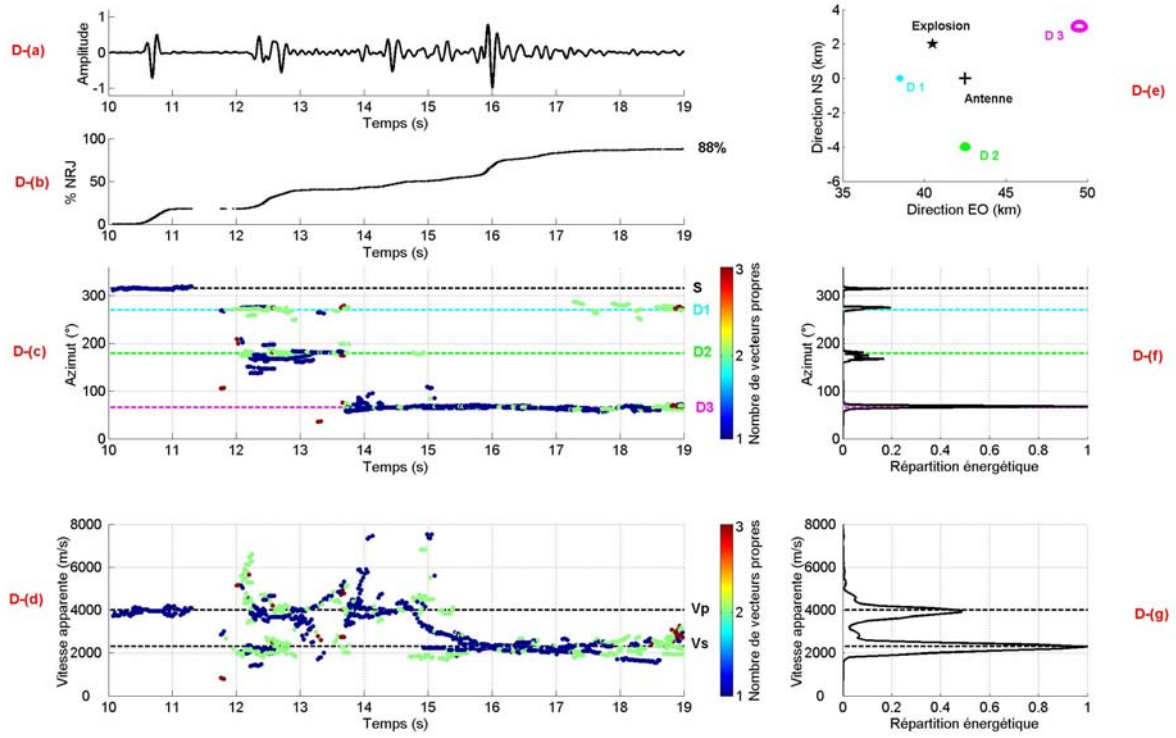


FIGURE D / COMPOSANTES NS



(suite légende) (a) Signal calculé pour un capteurs de l'antenne (composante NS). (b) Evolution temporelle de la quantité d'énergie expliquée dans les signaux par rapport à l'énergie globale contenue dans la décomposition temps-fréquence en lignes de crêtes. (c) et (d) Evolution temporelle des directions et des vitesses de propagation. (e) Rappel de la configuration géométrique du milieu de propagation. (f) et (g) Distribution énergétique des directions et des vitesses apparentes de propagation, pour l'ensemble des détections retenues sur (c) et (d).

Une décomposition temps-fréquence-nombre d'onde similaire à celle appliquée aux composantes NS a été réalisée sur les composantes EO et a permis d'obtenir les résultats présentés sur la Fig. 3-8. Le critère du maximum d'énergie expliquée a directement été appliqué pour sélectionner le nombre optimum de vecteurs propres. Les paramètres  $\Delta az$  et  $\Delta v_{app}$  sont similaires au cas précédent :  $\Delta az = \pm 1^\circ$  et  $\Delta v_{app} = \pm 200 \text{ m/s}$ .



FIGURE A / COMPOSANTES EO

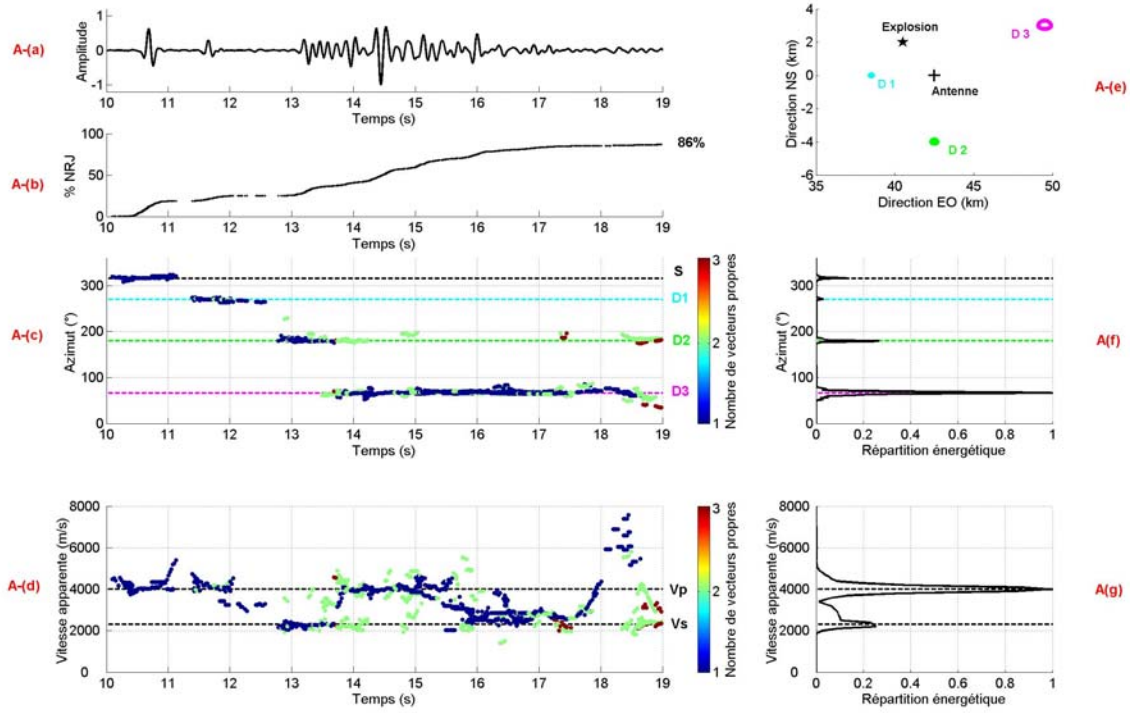


Fig. 3-8 : La figure A présente les résultats de l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde pour les composantes *EO*, lorsqu'un seul, puis deux et trois vecteurs propres sont utilisés pour décrire le sous-espace 'signal'. L'antenne se situe dans la position 1. Seules les détections présentant une stabilité temporelle et fréquentielle telle que  $\Delta az \leq 1^\circ$  et  $\Delta v_{app} \leq 200 \text{ m/s}$  ont été retenues.

(a) Signal calculé pour un des capteurs de l'antenne (composante *EO*). (b) Evolution temporelle de la quantité d'énergie expliquée dans les signaux par rapport à l'énergie globale contenue dans la décomposition temps-fréquence en lignes de crêtes. (c) et (d) Evolution temporelle des directions et des vitesses de propagation. (e) Rappel de la configuration géométrique du milieu de propagation. (f) et (g) Distribution énergétique des directions et des vitesses apparentes de propagation, pour l'ensemble des détections retenues sur (c) et (d).

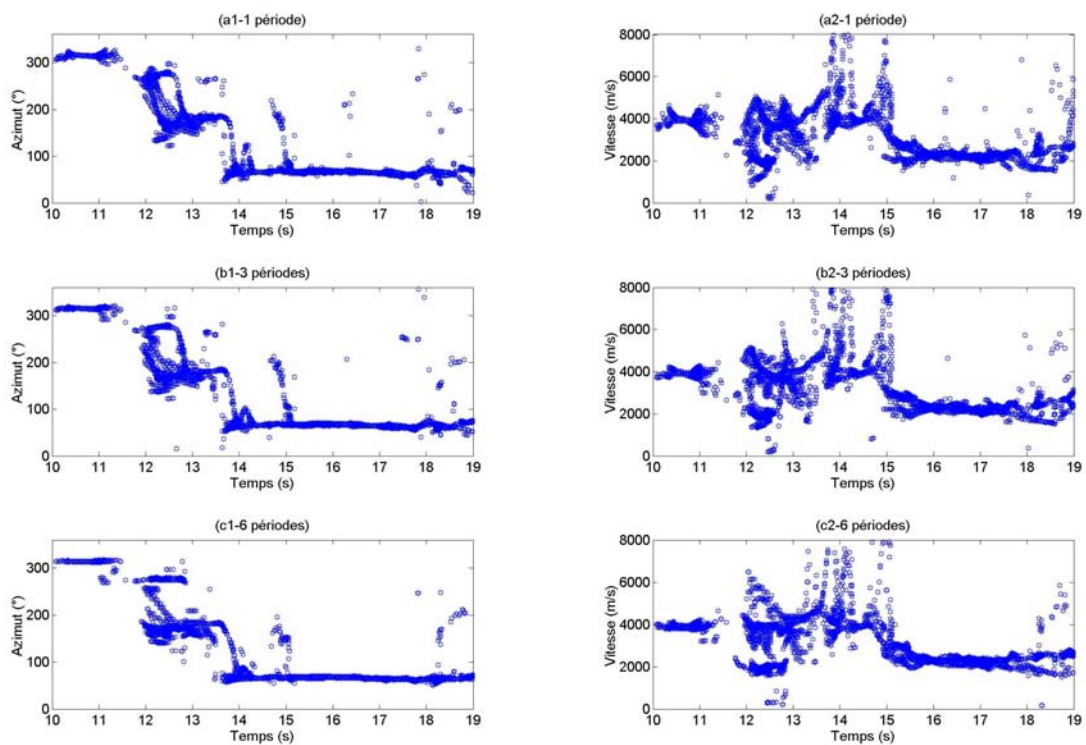
On retrouve les directions relatives au champ d'onde incident ainsi que celles correspondant aux trois hétérogénéités introduites dans le milieu de propagation. Sur les composantes *EO*, les phases *PIS* et *P2P* ne sont pas présentes, puisque les hétérogénéités 1 et 2 se situent respectivement dans les azimuts N270° et N180° et que la polarisation des ondes ne permet pas de voir ces deux phases sur ces composantes.

### 3.2.2. Influence des paramètres de calcul

Pour l'analyse fréquence-nombre d'onde, les signaux sont filtrés autour de chaque fréquence étudiée. Pour rester en accord avec la décomposition temps-fréquence, le filtre utilisé a une forme gaussienne, dont la largeur  $\Delta v$  est variable avec la fréquence tel que  $\frac{\Delta v}{v} = 0.4$ . Pour effectuer la décomposition en nombre d'onde, on a choisi d'utiliser une fenêtre temporelle glissante dont l'étendue

varie également selon la fréquence de la ligne de crêtes à laquelle on s'intéresse. Dans les résultats précédents, la largeur de la fenêtre avait été fixée à trois périodes de signal.

L'analyse sur les composantes *NS* présentée au paragraphe précédent a été refaite d'une part en diminuant puis d'autre part en augmentant la largeur de la fenêtre d'analyse. Nous avons d'abord fixé cette largeur à une seule période puis à six périodes de signal. Les résultats bruts issus de l'analyse fréquence-nombre d'onde sont présentés sur la Fig. 3-9. De manière à pouvoir directement comparer l'effet de la variation de la largeur de la fenêtre temporelle d'analyse, un seul vecteur propre a systématiquement été utilisé pour décrire le sous-espace '*signal*'.



**Fig. 3-9 : Décomposition temps-fréquence-nombre d'onde des composantes *NS*, pour différentes largeurs de la fenêtre temporelle d'analyse. (a1) et (a2) Evolution temporelle des directions et des vitesses de propagation lorsque la fenêtre d'analyse est égale à 1 période du signal analysé. (b1) et (b2) Evolution temporelle des directions et des vitesses de propagation lorsque la fenêtre d'analyse est égale à 3 périodes du signal analysé. (c1) et (c2) Evolution temporelle des directions et des vitesses de propagation lorsque la fenêtre d'analyse est égale à 6 périodes du signal analysé.**

On observe que lorsque l'on augmente la largeur de la fenêtre temporelle, les composantes *PIS* (N270°) et *P2P* (N180°), entre 12 et 13sec., sont de mieux en mieux séparées. Le nombre d'échantillons temporels sur lequel la décomposition en nombre d'onde est calculée devient alors de plus en plus important et augmente la quantité d'information présente dans la fenêtre d'analyse : la détermination des paramètres de propagation devient meilleure et plus précise.

D'un autre côté, on observe que lorsque l'on augmente la largeur de la fenêtre d'analyse, les détections caractérisées par une faible durée temporelle disparaissent. L'évolution des paramètres de propagation

devient de plus en plus lisse. Ainsi, peu après 13sec., des détections relatives à l'hétérogénéité 1 sont présentes lorsque la durée de la fenêtre d'analyse est égale à 1 seule période de signal. Ces détections sont encore présentes lorsque trois périodes de signal sont utilisées pour disparaître complètement lorsque six périodes de signal ont été utilisées comme largeur de fenêtre. L'utilisation d'une fenêtre d'analyse plus longue a donc également pour effet de masquer les phases sismiques de courte durée.

Encore une fois, un compromis existe entre la durée adéquate de la fenêtre d'analyse et les informations que l'on cherche à extraire des signaux. Nous avons choisi d'analyser les signaux avec une fenêtre de durée temporelle moyenne égale à 3 périodes du signal, favorisant ainsi la stabilité des paramètres de propagation. De plus, nous cherchons à caractériser la propagation de phases multiples à travers l'antenne. Nous pensons alors qu'augmenter le nombre d'échantillons sur lequel l'analyse est faite favorise la bonne détermination des paramètres de propagation de phases se propageant simultanément à travers l'antenne.

### **3.2.3. Bilan énergétique**

Les distributions énergétiques des azimuts obtenues sur les composantes *NS* et *EO* montrent que le maximum d'énergie n'est pas corrélé à l'azimut du champ d'onde primaire ( $N315^\circ$ ). C'est l'hétérogénéité 3 qui est responsable de la majeure partie de l'énergie portée par les sismogrammes. La Fig. 3-10-(a) montre la distribution de l'énergie expliquée en fonction des directions et des vitesses de propagation. Cette énergie est constituée de la somme des énergies détectées sur les composantes *NS* et *EO*, et a été normalisée par rapport à son maximum. On observe bien les paquets d'énergie relatifs à la diffraction du champ d'onde primaire en onde *P* et *S* sur chacune des hétérogénéités ainsi que la contribution de la source. On retrouve également que l'hétérogénéité 3 est réellement celle qui diffracte le plus d'énergie. Pour cette hétérogénéité, il n'y a pas de prédominance des ondes de type *P* ou *S* : elles ont un poids similaire dans le bilan énergétique. Par contre, pour les hétérogénéités 1 et 2, les diffractions en ondes *S* prédominent : peu d'énergie est reliée aux phases *PIP* et *P2P*.

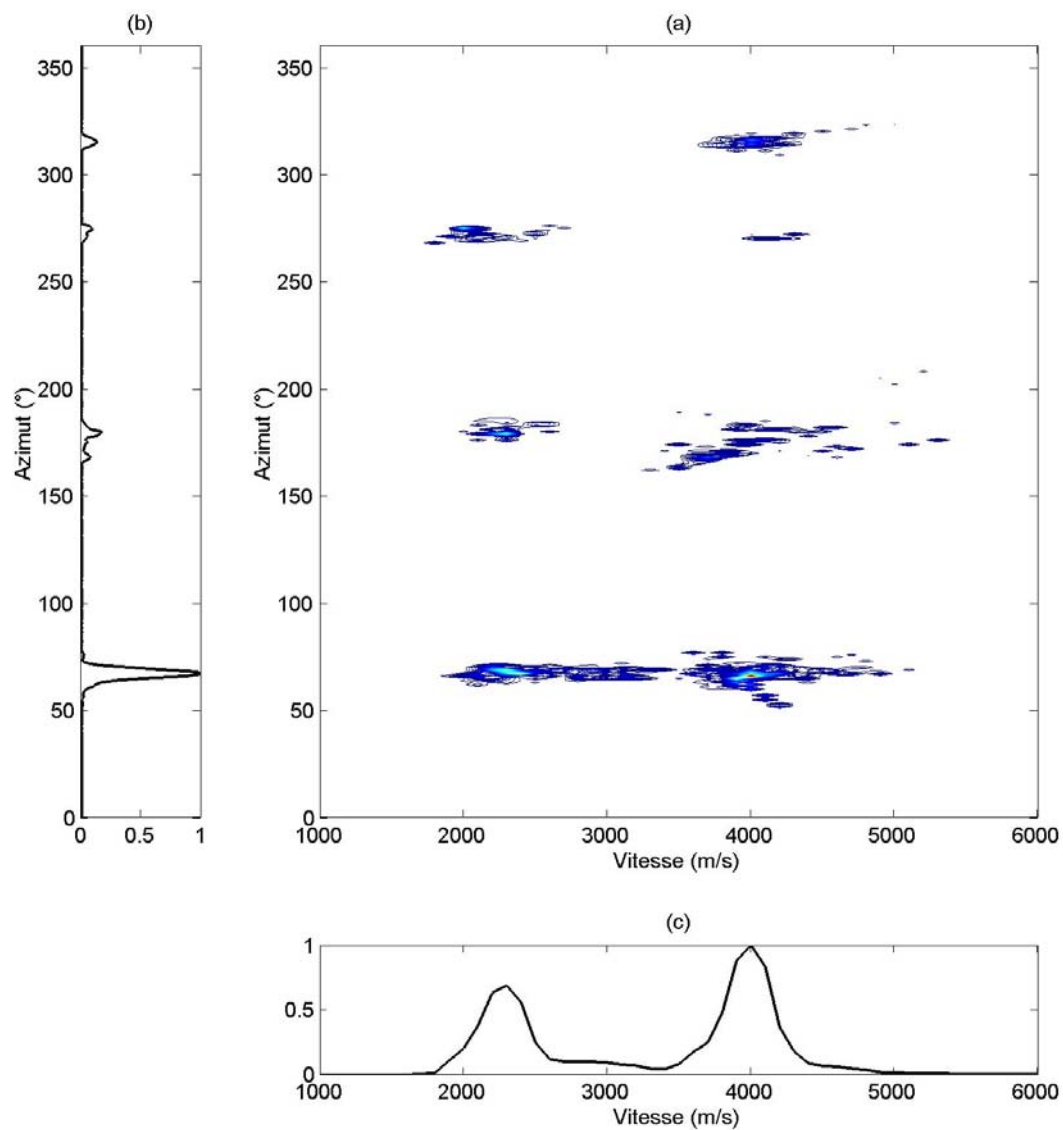


Fig. 3-10 : (a) Répartition de l'énergie expliquée en fonction des directions et des vitesses de propagation. (b) Répartition de l'énergie en fonction des directions de propagation. (c) Répartition de l'énergie en fonction des vitesses de propagation. L'antenne se trouve dans la position 1. Le contenu fréquentiel de la fonction source est centré sur 5Hz.

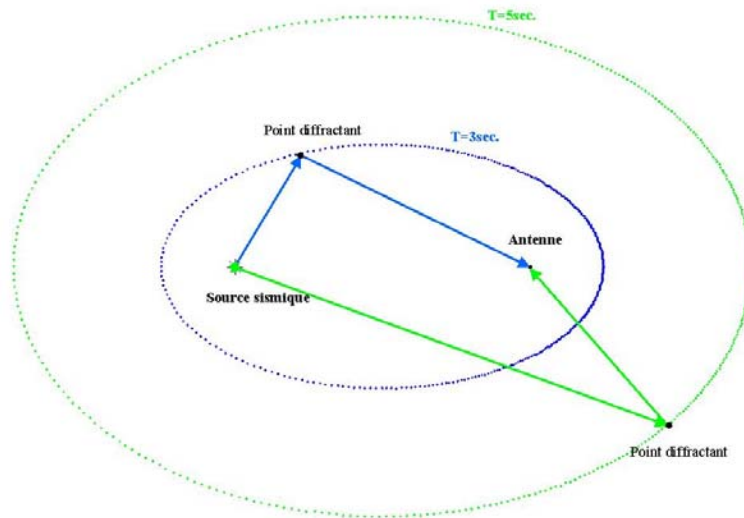
Le Tableau 3-2 indique le pourcentage d'énergie diffractée par chacune des hétérogénéités introduites dans le milieu de propagation, par rapport à l'énergie globalement détectée dans les sismogrammes. On retrouve que l'hétérogénéité 3 est celle qui diffracte le plus d'énergie. L'hétérogénéité 1 est celle qui influence le moins la propagation des ondes dans le milieu.

	Energie (%)
Source	8
Hétérogénéité 1	7
Hétérogénéité 2	16
Hétérogénéité 3	69

**Tableau 3-2 : Pourcentage d'énergie que représente le champ d'onde primaire et le champ diffractée par chacune des hétérogénéités introduites dans le milieu de propagation par rapport à l'énergie globalement contenue dans la décomposition en lignes de crêtes. L'antenne se situe dans la position 1.**

### 3.2.4. Inversion des paramètres de propagation

Pour savoir avec quelle précision le milieu de propagation peut être retrouvé à partir de l'ensemble des détections que nous avons obtenu par la décomposition temps-fréquence-nombre d'onde des sismogrammes, nous faisons l'hypothèse de diffraction simple (Aki, 1969). Nous considérerons que l'ensemble des phases diffractées, contenues dans les sismogrammes ne résultent que d'un trajet simple entre la source, une des trois hétérogénéités du milieu et l'antenne sismologique. Avec cette hypothèse, nous sommes capables de relier chacune de nos détections à un point diffractant et de localiser la position du point diffractant. Ce dernier se situe sur une ellipse dont les foyers sont respectivement la source sismique et l'antenne d'observation. Les caractéristiques de cette ellipse sont entièrement déterminées par la vitesse de propagation du milieu et le temps qui s'est écoulé depuis le temps origine de la perturbation sismique. Au fur et à mesure que le temps s'écoule, l'ellipse s'élargit et des points diffractants de plus en plus lointains ont pu participer à la génération du champ d'onde diffracté. La Fig. 3-11 illustre la méthode pour un milieu où la vitesse de propagation est de 1000 m/s. Le lieu des points géographiques potentiellement atteints par le champ d'onde incident est représenté pour des temps successivement égaux à 3sec. (ellipse bleue) et 5sec. (ellipse verte). L'étoile noire représente la position de la source et le point noir celle de l'antenne. On a également représenté deux trajets possibles et quelconques du champ d'onde pour les deux instants 3sec. et 5sec.



**Fig. 3-11 : Lieu des points géographiques où sont localisés les points diffractants que peut atteindre le champ d'onde primaire après un temps de propagation  $T=3\text{sec.}$  (en bleu) et  $T=5\text{sec.}$  (en vert). Deux trajets quelconques du champ d'onde sont représentés.**

Dans le problème que nous avons à résoudre, nous connaissons d'une part le temps d'arrivée de chacune des détections et d'autre part la vitesse de propagation à travers l'antenne des phases relatives à chacune de ces détections (dans notre cas, la vitesse apparente obtenue par l'analyse en nombre d'onde est aussi la vitesse réelle de propagation du champ d'onde dans le milieu puisque ce dernier est plan). La vitesse de propagation obtenue par l'analyse en antenne est celle avec laquelle les ondes diffractées se propagent depuis chaque diffracteur jusqu'à l'antenne. La vitesse de propagation du champ d'onde primaire, depuis la source jusqu'aux diffracteurs, égale toujours  $4\text{km/s}$ , puisque uniquement des ondes du type  $P$  sont présentes.

Nous sommes donc en mesure de déterminer l'ensemble des points diffractants potentiellement responsable de chacune des détections, autrement dit de construire les ellipses relatives à chaque détection. Chaque ellipse est définie par un ensemble infini de points. Cependant, nous connaissons également la direction de propagation selon laquelle se propage chacune des phases diffractées par les différentes hétérogénéités. L'ensemble de points qui était infini se restreint donc à un seul point diffractant, parfaitement localisé dans l'espace.

Nous avons localisé les points diffractants correspondant à l'ensemble des détections précédemment obtenues par l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde. Les résultats sont présentés sur la Fig. 3-12. On a simultanément tenu compte des composantes  $NS$  et  $EO$ . Nous n'avons pas directement représenté la position des points diffractants mais l'énergie globalement associée à chacun des points localisés. Le milieu de propagation théorique a été superposé à nos résultats.

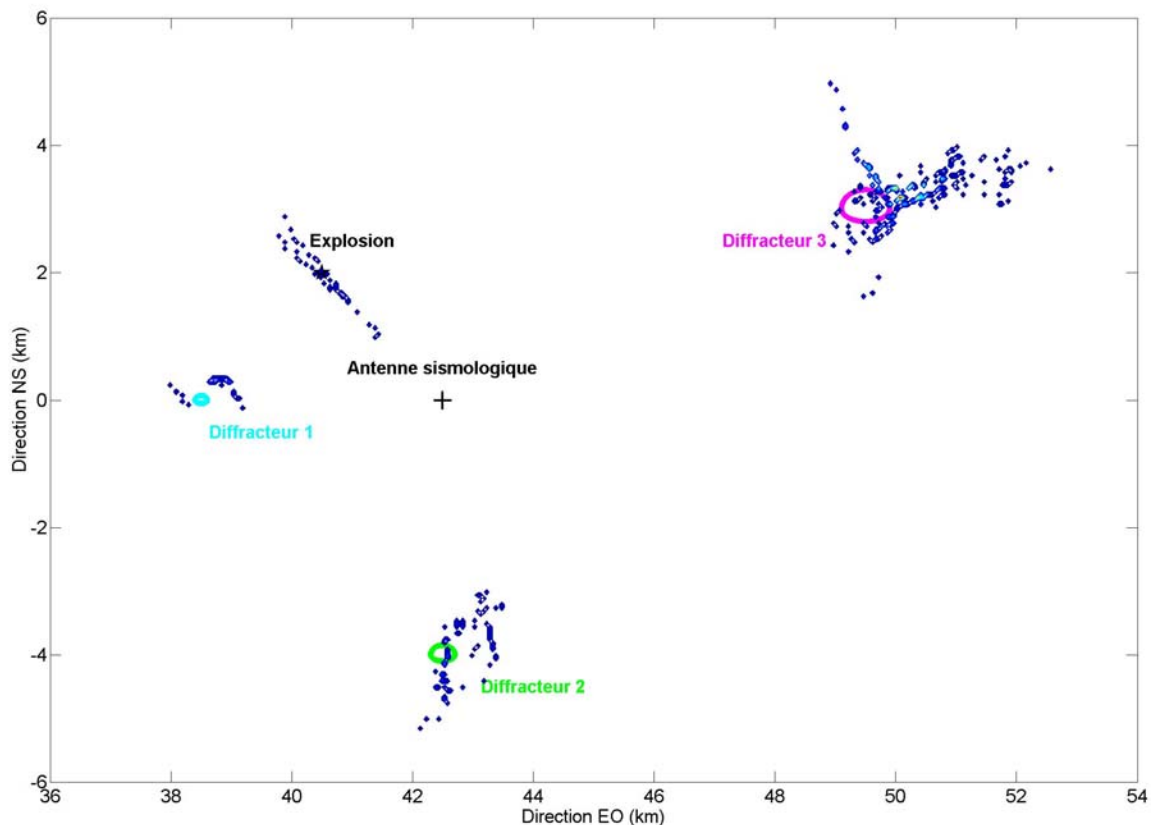


Fig. 3-12 : Reconstruction des différentes zones hétérogènes du milieu de propagation à partir des détections obtenues lors de l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde. Le milieu de propagation reconstruit est superposé au milieu de propagation théorique. L'antenne se situe dans position 1.

La position de la source est correctement retrouvée, ainsi que la présence des trois diffracteurs. On retrouve également un résultat mis en évidence par ailleurs lors de l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde qui est que l'hétérogénéité qui diffracte le maximum d'énergie est l'hétérogénéité 3.

On observe cependant de légers biais dans la localisation de l'énergie. Ces écarts, entre la localisation des diffracteurs à partir des détections et leurs localisations réelles, sont de deux types :

- on a des écarts dans la **direction orthogonale** à celle qui lie les diffracteurs à l'antenne. Ces écarts viennent principalement des biais qui existent dans la détermination des directions de propagation lors de la décomposition en nombre d'onde. Ces biais sont généralement induits par le fait que plusieurs composantes se propagent simultanément à travers l'antenne. C'est par exemple le cas pour le diffracteur 1 du milieu de propagation, où on observe un biais de  $7^\circ$  vers le nord dans la localisation de sa position, ou le diffracteur 2 où une partie de l'énergie est également mal localisée. Par contre, lorsqu'une phase est seule présente, (c'est la cas avant 11sec., où seul le champ d'onde primaire se propage à travers l'antenne), aucun biais n'est observé par rapport à la localisation théorique.

- on a des écarts de localisation dans la **même direction** que celle qui lie les diffracteurs à l'antenne. Ces écarts peuvent avoir plusieurs origines :

(1) chacune des phases qui se propagent à travers l'antenne a une durée fixe, qui ne se réduit pas à une seule détection temporelle. Cette durée a pour conséquence un allongement spatial dans la localisation de l'énergie lors de l'inversion des différentes détections. Par exemple, la localisation étendue de la source sismique autour de sa position théorique (étoile noire, Fig. 3-12) est induite sa durée temporelle (0.2sec.).

(2) dans certain cas, le champ d'onde diffracté par les différentes hétérogénéités ne se traduit pas par une seule phase qui est une réplique plus ou moins réfléchie de la source mais par la présence d'une coda, caractérisée par une certaine durée. C'est cette durée qui peut être à l'origine d'un allongement de l'énergie dans la même direction que celle qui lie les diffracteurs à l'antenne. Si l'ensemble de la coda est caractérisée par des paramètres de propagation stables, l'ensemble des points diffractants se localisent suivant la direction qui relie l'antenne à l'hétérogénéité, sur des ellipses de plus en plus larges. De tels allongements sont observés dans la localisation des hétérogénéités 2 et 3, dans la direction opposée à celle qui lie les diffracteurs à l'antenne.

(3) les diffractions multiples ont été négligées, et l'hypothèse d'une diffraction simple a été faite dans le modèle d'inversion de l'ensemble des détections. Ainsi, l'analyse des composantes *NS* a montré qu'entre 15 et 17sec., de l'énergie de propage à travers l'antenne dans la direction de l'hétérogénéité 1. Comme il a déjà été discuté, il est fort probable que cette énergie soit le résultat d'artefacts de calcul lors de la simulation numérique des signaux synthétiques. Une autre interprétation possible de ces détections est qu'elles soient le résultat de diffractions multiples. L'énergie diffractée par l'hétérogénéité 3 est renvoyée dans la direction de l'hétérogénéité 1, qui à son tour peut renvoyer de l'énergie dans la direction de l'antenne. Ce processus de diffractions multiples permettrait d'expliquer les arrivées tardives d'énergie, liées à la diffraction par l'hétérogénéité 1.

(3) la propagation de composantes multiples à travers l'antenne peut conduire à une mauvaise estimation des vitesses de propagation. Cependant, nous avons également montré que ce type de détections sont généralement caractérisées par une énergie très faible, et ne contribuent donc que très peu au bilan énergétique ainsi qu'à la localisation spatiale des points de diffraction les plus énergétiques.



### 3.2.5. Conclusions

Les résultats obtenus sur ce premier cas synthétique :

- valident l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde que nous avons développé dans le chapitre II. Les principales directions de propagation ainsi que les vitesses du milieu sont correctement retrouvées.
- montrent la difficulté à caractériser le champ d'onde dès lors que plusieurs phases se propagent simultanément à travers l'antenne. L'algorithme *MUSIC* a l'avantage de permettre une meilleure séparation des composantes multiples qui interagissent dans les mêmes fenêtres temporelles et aux mêmes fréquences. Nous avons montré comment les paramètres de propagation varient avec le nombre de vecteurs propres utilisés pour caractériser le sous-espace '*signal*'. Nous avons également montré que chercher à caractériser plus d'une phase, dans une fenêtre temporelle donnée pouvait introduire un biais dans l'estimation des paramètres de propagation. Nous montrons ainsi l'utilité d'un critère de vérification *a posteriori* de la pertinence de ces paramètres.

Le critère de reconstruction du maximum d'énergie a été adopté pour nous guider dans la caractérisation du sous-espace '*signal*' et dans le nombre de phases que nous pouvons prétendre analyser dans une même fenêtre temporelle et pour une fréquence donnée.

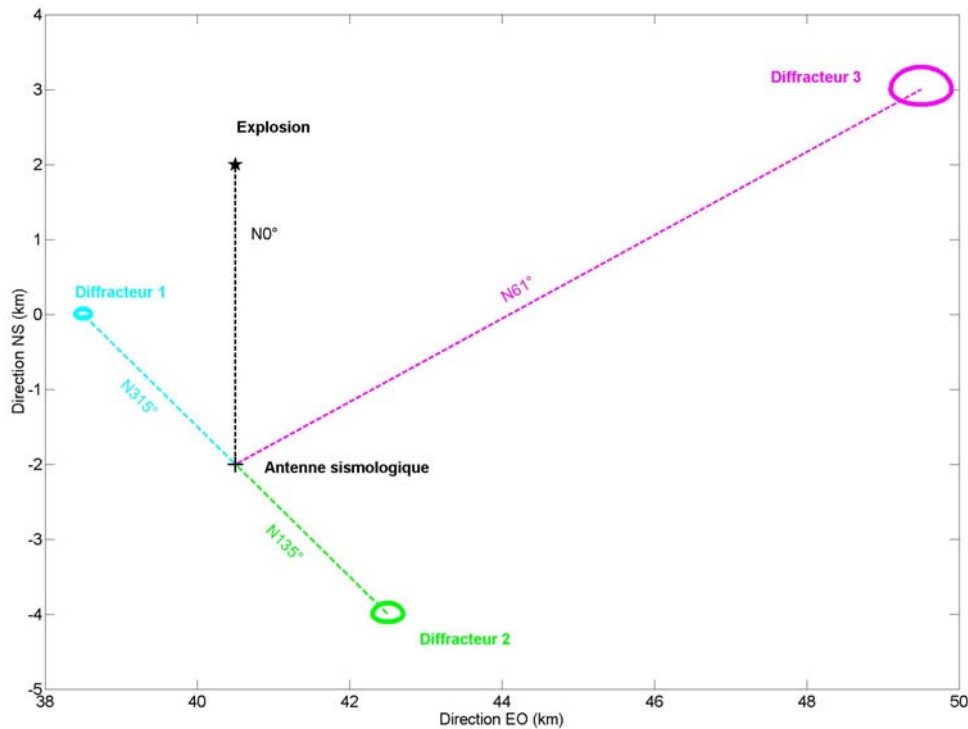
- montrent que la direction de propagation la plus énergétique du sismogramme n'est pas corrélée à celle de la source. Ce résultat a déjà été mis en évidence par ailleurs sur l'analyse de données réelles, comme par exemple sur les données enregistrées lors de l'expérience de Caille (Tressols, 1996) ou celles enregistrées lors de l'expérience d'Annot (voir chapitre IV).
- montrent comment les détections obtenues par notre analyse se traduisent lorsque l'on cherche à retrouver le milieu de propagation. En utilisant une technique simple de reconstruction du milieu, nous avons été capables de localiser la position des différentes hétérogénéités présentes dans le milieu de propagation, ainsi que celle de la source sismique. Des biais sont cependant présents dans la localisation spatiale de l'énergie. Ces biais sont en partie le résultat d'interférences lorsque plusieurs phases se propagent simultanément à travers l'antenne. Les délocalisations d'énergie peuvent également être expliquées par la coda générée par chacun des diffracteurs, coda due aux interactions complexes qui existent entre le champ d'onde primaire et les différentes hétérogénéités. Enfin, les processus de diffractions multiples n'ont pas été

pris en compte dans la reconstruction du milieu de propagation et peuvent également conduire à une délocalisation de l'énergie.

### 3.3. Influence de la position de l'antenne

#### **3.3.1. Le milieu de propagation**

Nous allons à présent quantifier l'influence de la position du dispositif d'enregistrement dans le milieu de propagation. La nouvelle position de l'antenne est représentée sur la Fig. 3-13 et sera appelée **position 2**. Il a subi une translation de 2.2 km vers le *SO*. Les directions de propagation théoriques de chacun des diffracteurs, vu depuis l'antenne, sont maintenant N315° (diffracteur 1), N135° (diffracteur 2) et N61° (diffracteur 3). La source est localisée dans la direction N0°. Les paramètres rhéologiques et élastiques du milieu sont inchangés par rapport à la **position 1** de l'antenne.

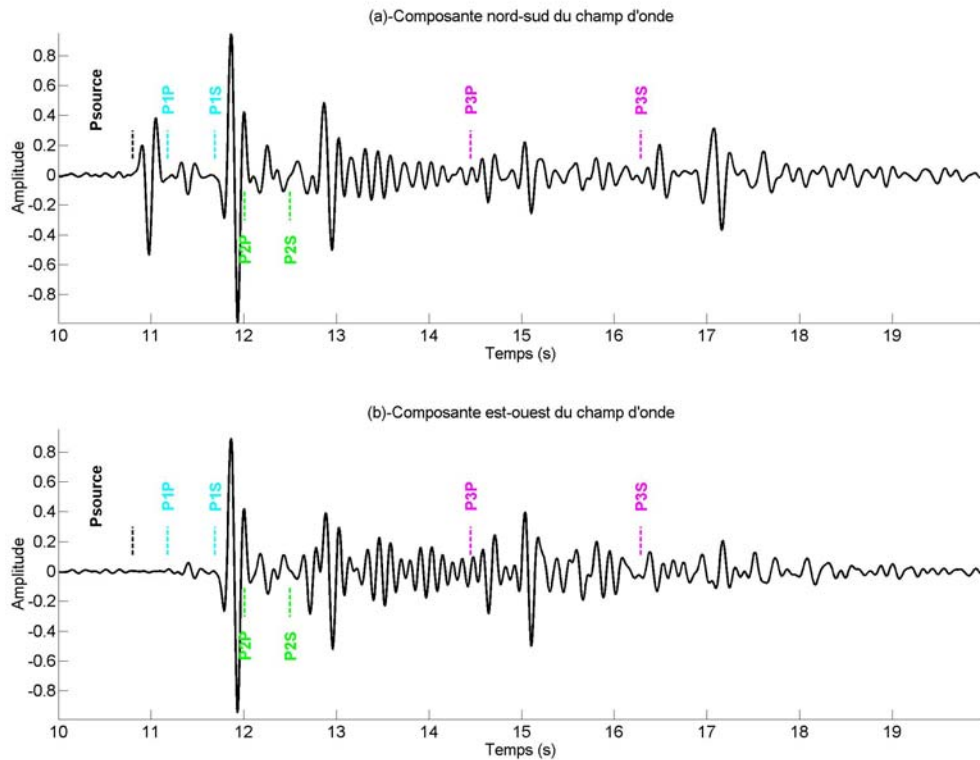


**Fig. 3-13 : Configuration géométrique du milieu de propagation. Les positions de la source sismique (explosion), de l'antenne (**position 2**) et de chaque diffracteur ont été représentées. Par rapport à la première configuration, la position de l'antenne a été modifiée.**

Ce deuxième jeu de signaux synthétiques va nous permettre de mesurer l'influence de la configuration source-diffracteur-antenne sur le taux d'énergie diffractée par chacune des hétérogénéités. La même méthode de calcul que celle décrite précédemment a été utilisée pour calculer les sismogrammes synthétiques.

### 3.3.2. Les signaux

Les signaux ainsi calculés pour cette nouvelle configuration sont représentés sur les Fig. 3-14 pour les composantes *NS* et *EO*. Comme précédemment, les temps théoriques de propagation ont été superposés à ces signaux.

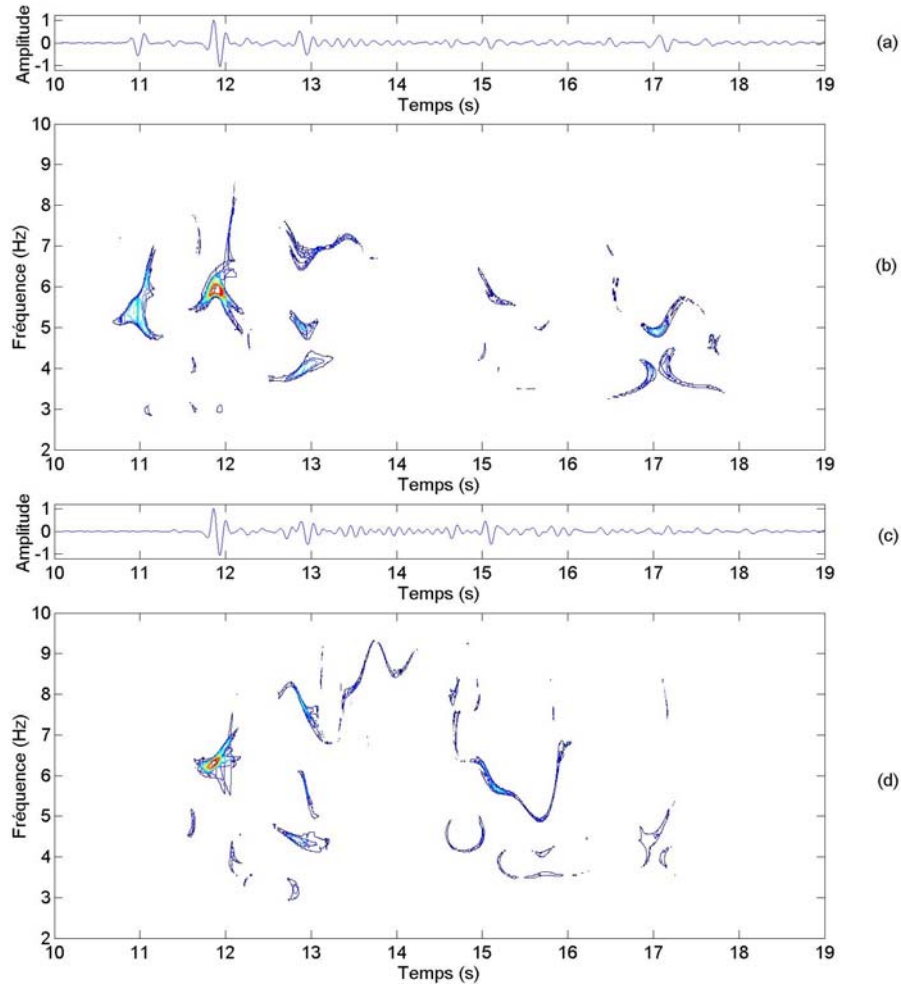


**Fig. 3-14 : Signaux synthétiques correspondant à (a) la composante *NS* et (b) la composante *EO*, calculé pour un des capteurs de l'antenne sismologique. La position de l'antenne a été modifiée par rapport à la première configuration.**

Contrairement au cas précédent, la source n'est présente que sur les composantes *NS*, puisqu'elle admet une position  $N0^\circ$  par rapport à l'antenne. D'autre part, les hétérogénéités 1 et 2 apportent maintenant leurs contributions sur les composantes *NS* ainsi que *EO*. On peut déjà constater que la phase la plus énergétique est la phase diffractée *P1S*. L'hétérogénéité 1 semble maintenant avoir un plus grand rôle dans la part du champ d'onde diffractée. Les deux phases énergétiques qui caractérisaient la coda des phases *P3P* et *P3S* lors de l'analyse des signaux pour la **position 1** de l'antenne sont encore présentes dans la **position 2** de l'antenne.

### 3.3.3. Analyse temps-fréquence-nombre d'onde

Les décompositions temps-fréquence globales calculées respectivement pour les composantes *NS* et *EO* sont présentées sur la Fig. 3-15. On a utilisé les mêmes paramètres de calculs que pour le cas précédent.



**Fig. 3-15 : (a) Composante *NS* calculée pour un des capteurs de l'antenne. (b) Décomposition globale en lignes de crêtes des composantes *NS*. (c) Composante *EO* calculée pour un des capteurs de l'antenne. (d) Décomposition globale en lignes de crêtes des composantes *EO*. La position de l'antenne a été modifiée par rapport à la première configuration.**

Les résultats de l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde, avec choix du nombre de vecteurs propres à l'aide du critère du maximum d'énergie expliquée, sont représentés sur la Fig. 3-16 pour les composantes *NS* et *EO*. Les paramètres utilisés pour évaluer la stabilité temporelle des directions et des vitesses de propagation sont  $\Delta az < 1^\circ$  et  $\Delta vapp < 200 \text{ m/s}$ .

FIGURE A / COMPOSANTES NS

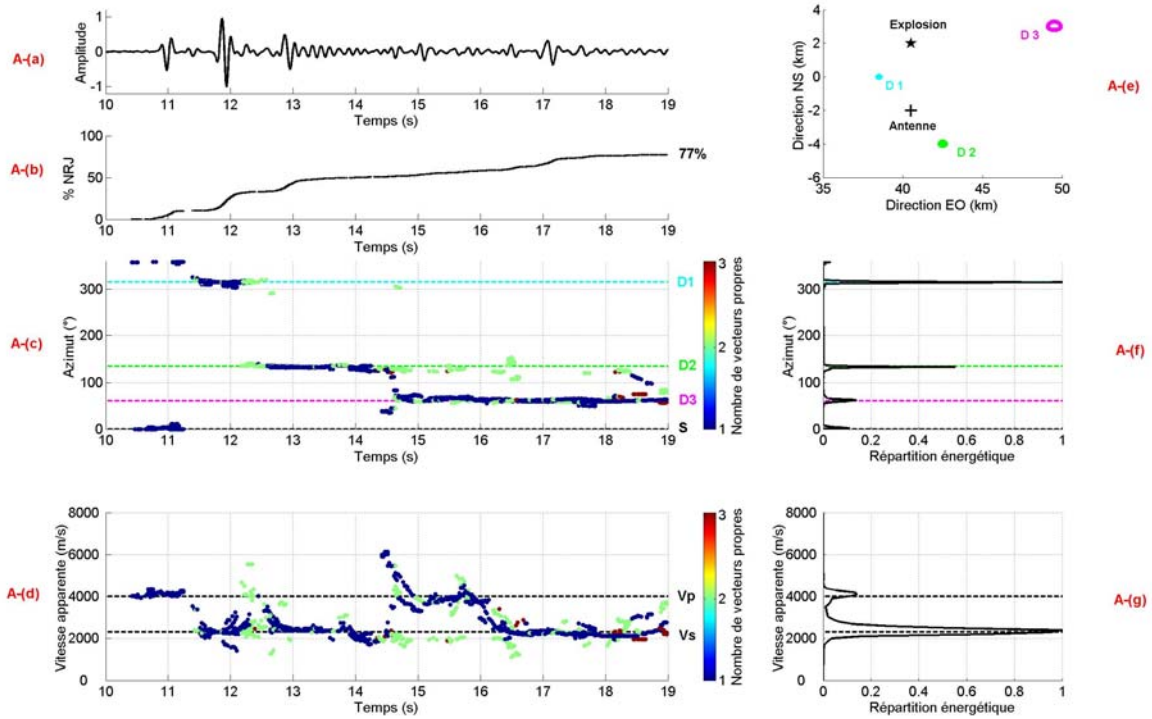


FIGURE B / COMPOSANTES EO

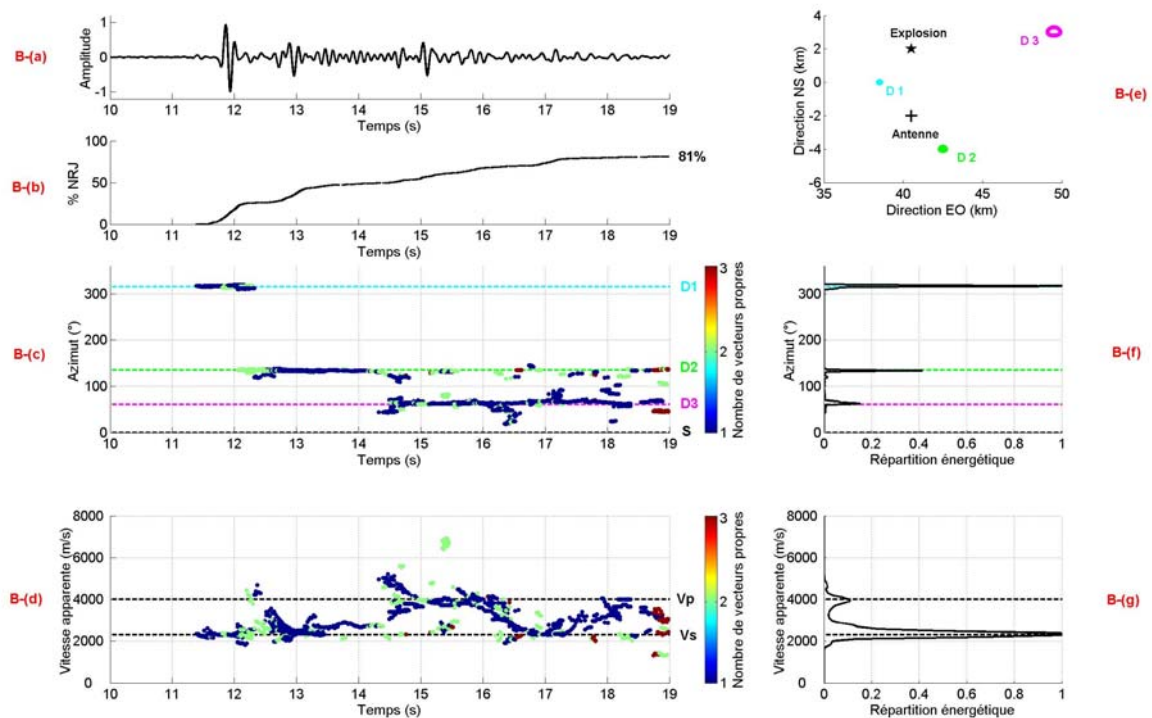


Fig. 3-16 : Les figures A et B représentent les résultats de l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde pour les composantes NS et EO respectivement lorsque le critère du maximum d'énergie a été utilisé pour sélectionner le nombre de vecteurs propres pour décrire le sous-espace 'signal'. L'antenne se situe dans la position 2.

Comme pour le cas précédent, les répartitions énergétiques des directions et des vitesses de propagation permettent de retrouver les paramètres théoriques introduits dans le milieu. La phase *PIP* est faiblement énergétique et n'a quasiment pas été détectée par l'analyse en nombre d'onde. Par contre, malgré sa très faible amplitude, la phase *P2P* a clairement été caractérisée, et ceci sur les deux composantes. Comme précédemment, pour les hétérogénéités 1 et 2, la diffraction en onde *S* prédomine. A partir du temps 14.5sec. et jusqu'à la fin du signal, l'énergie diffractée par l'hétérogénéité 3 se propage à travers l'antenne, d'abord en onde *P*, puis en onde *S*. En même temps, des détections relatives à l'hétérogénéité 2 sont également présentes.

Dans l'analyse des signaux relatifs à la **position 2** de l'antenne, nous avons jugé intéressant de montrer ce que deviennent les paramètres de propagation, lorsque trois vecteurs propres sont utilisés dans la description du sous-espace '*signal*' (Fig. 3-17/composantes *EO*). Les directions de propagation permettent maintenant de parfaitement détecter la coda relative à l'hétérogénéité 2. De plus, des détections relatives à l'hétérogénéité 1 sont également présentes entre 17 et 19sec., comme il avait déjà été observé lorsque l'antenne occupait la **position 1**. Il semble alors que chacune des hétérogénéités renvoie des ondes diffractées, d'énergie plus ou moins faible, et ceci pendant une longue durée temporelle. C'est le cas pour l'hétérogénéité 2, et certainement aussi pour l'hétérogénéité 1. Si on compare la distribution énergétique des directions de propagation obtenue (Fig. 3-16, graphe B-(f)) lorsque le critère du maximum d'énergie expliquée a été utilisé avec celle obtenue lorsque trois vecteurs propres ont été utilisés (Fig. 3-17, graphe A-(f)), on s'attend à augmenter l'énergie relative aux diffractions générées par l'hétérogénéité 2. Or, c'est la situation inverse qui est observée. Si trois vecteurs propres permettent de caractériser la présence simultanée d'un plus grand nombre de phases, la dispersion observée sur les paramètres de propagation (notamment pour les vitesses de propagation) conduisent à diminuer l'énergie globale liée aux phases secondaires.

FIGURE A / COMPOSANTES EO

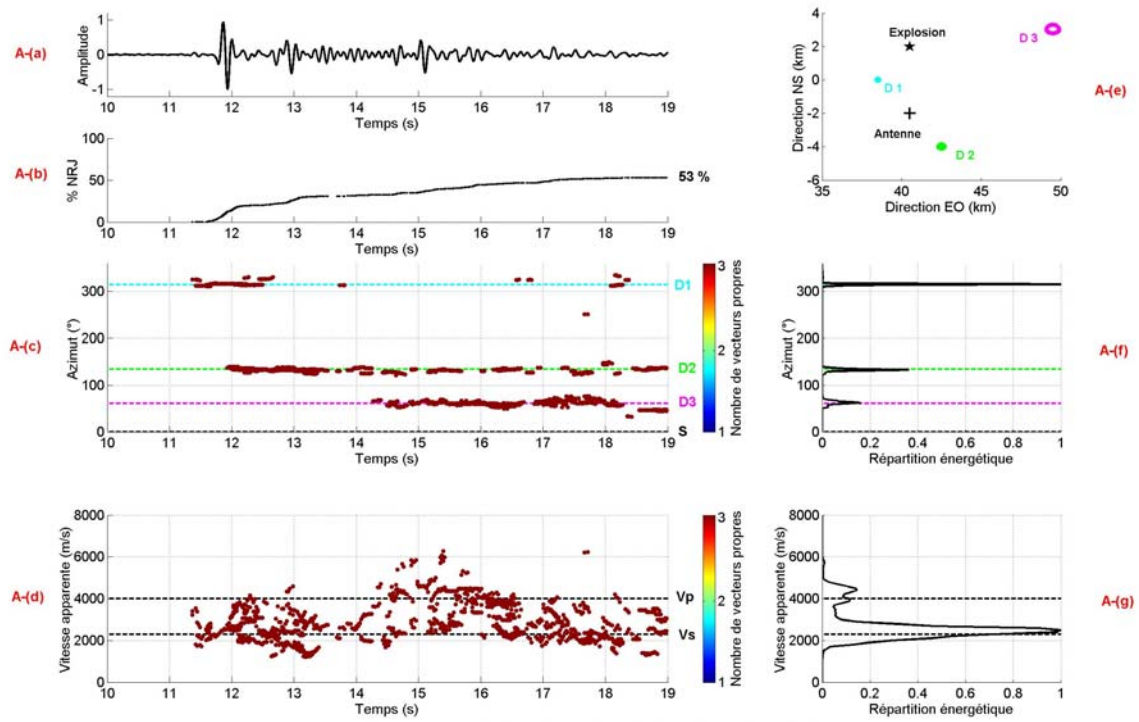


Fig. 3-17 : La figure A représente les résultats de l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde pour la composante *EO* lorsque trois vecteurs propres ont été utilisés pour décrire le sous-espace '*signal*'. L'antenne se situe dans la position 2.



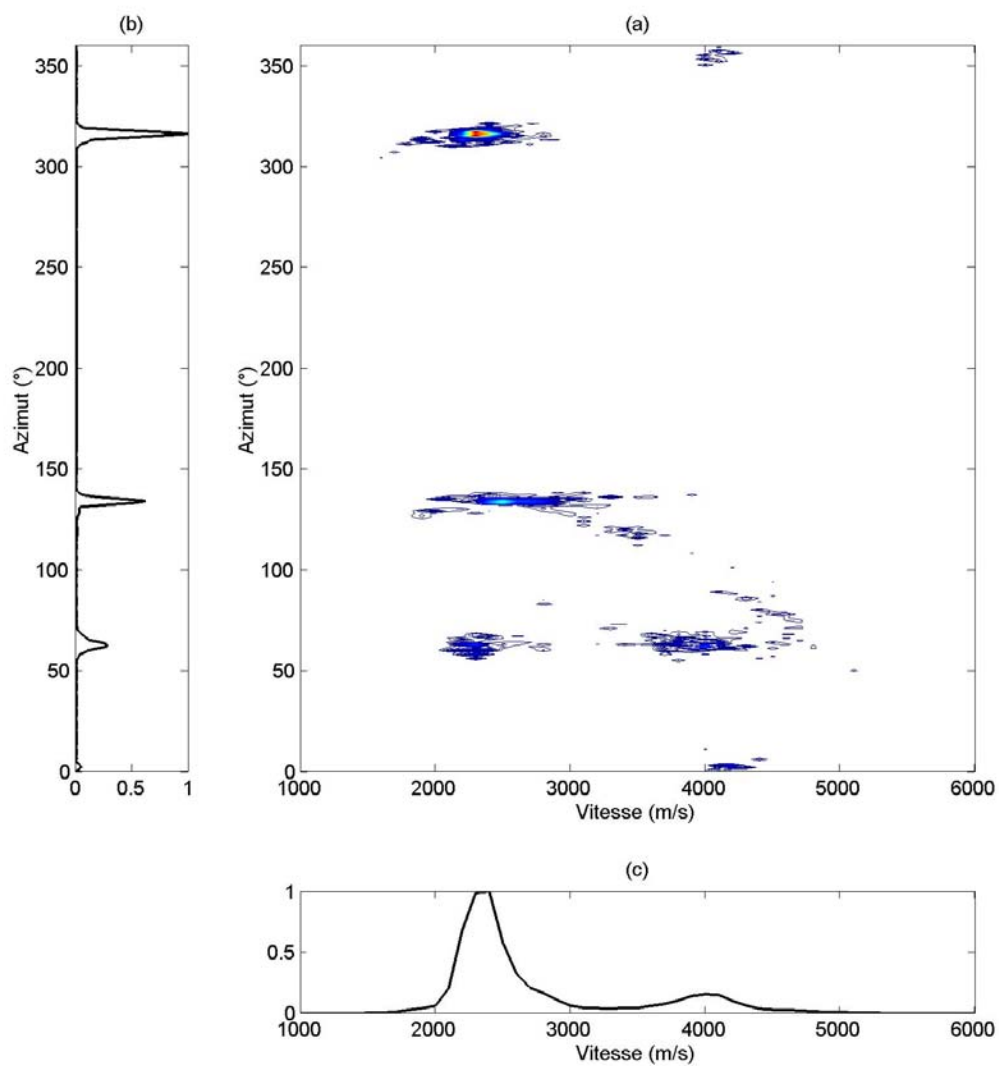
### 3.3.4. Bilan énergétique

D'un point de vue énergétique, lorsque l'antenne d'observation admet la **position 2** dans le milieu de configuration, la situation s'est complètement inversée par rapport à celle que l'on avait observé pour la **position 1** de l'antenne (3.2.3). L'hétérogénéité 3 qui dominait alors le bilan énergétique est maintenant celle qui diffracte le moins d'énergie. Dans le Tableau 3-3, on a reporté le pourcentage d'énergie associée à chacun des diffracteurs. Cette fois-ci, le champ d'onde primaire représente le plus faible pourcentage d'énergie. L'énergie associée à l'hétérogénéité 2 est du même ordre que celle qui avait été observée lorsque l'antenne était en **position 1**.

	Energie
Source	4
Hétérogénéité 1	57
Hétérogénéité 2	25
Hétérogénéité 3	14

**Tableau 3-3 : Pourcentage d'énergie que représente le champ d'onde primaire et le champ diffracté par chacune des hétérogénéités introduites dans le milieu de propagation par rapport à l'énergie globalement contenue dans la décomposition en lignes de crêtes. L'antenne se situe dans la position 2.**

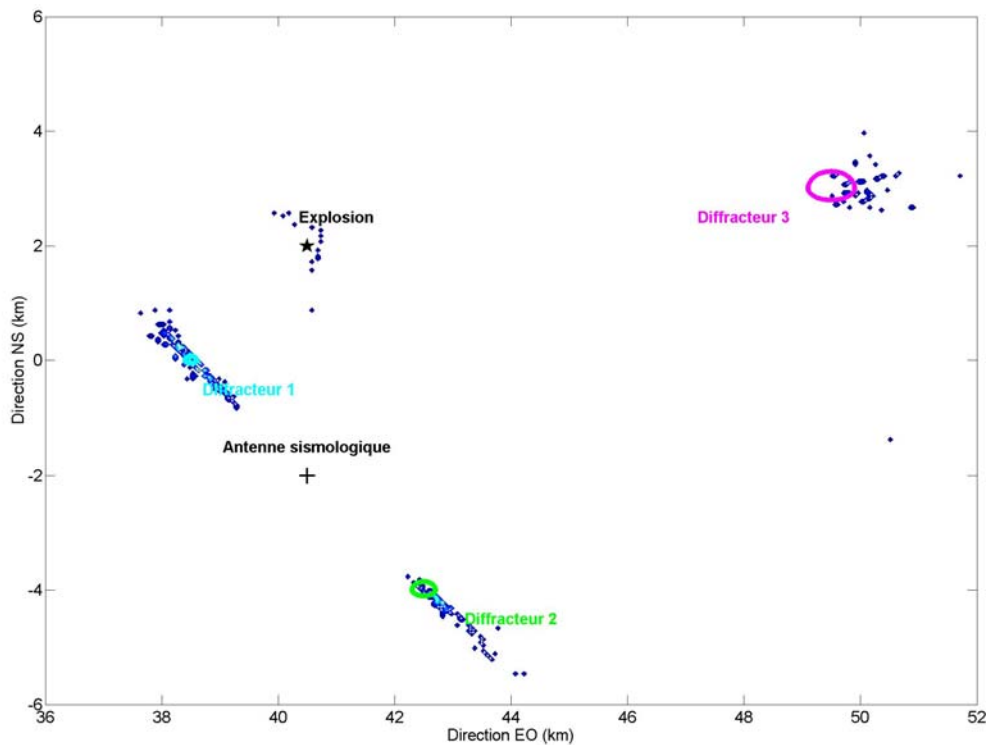
L'hétérogénéité 1 est celle qui influence de façon prépondérante le champ d'onde primaire. Près de 60% de l'énergie contenue dans les sismogrammes provient de la diffraction du champ d'onde primaire sur cette hétérogénéité. On a tracé sur la Fig. 3-18 la répartition de l'énergie en fonction des directions et des vitesses de propagation. On retrouve la contribution de la source ainsi que celle du champ d'onde diffracté *P* et *S* par l'hétérogénéité 3. Concernant l'hétérogénéité 1 et 2, on ne retrouve que les contributions des diffractions en ondes *S*, celles en ondes *P* étant complètement négligeable.



**Fig. 3-18 :** (a) Répartition de l'énergie expliquée sur les composantes *NS* et *EO* en fonction des directions et des vitesses de propagation. (b) Répartition de l'énergie en fonction des directions de propagation. (c) Répartition de l'énergie en fonction des vitesses de propagation. L'antenne admet la *position 2* dans le milieu de propagation.

### 3.3.5. Inversion des paramètres de propagation

Nous avons inversé les paramètres de propagation obtenus pour chacune des composantes de manière à retrouver les zones hétérogènes qui ont donné naissance au champ d'onde diffracté. Le même principe que celui utilisé dans le paragraphe 3.2.4 a été utilisé. Les résultats sont présentés sur la Fig. 3-19.



**Fig. 3-19 : Reconstruction des différentes zones hétérogènes du milieu de propagation à partir des détections obtenues lors de l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde. Le milieu de propagation reconstruit est superposé au milieu de propagation théorique. L'antenne admet la position 2 dans le milieu de propagation.**

Les trois hétérogénéités ainsi que la position de la source sont retrouvés. L'étalement de l'énergie relative aux diffractions sur l'hétérogénéité 2, dans la direction antenne-hétérogénéité est du à l'inversion des détections liées à cette hétérogénéité et formant la coda générée par ce diffracteur, observée sur une longue durée. La majorité de l'énergie est localisée au voisinage de l'hétérogénéité 1. On observe, comme pour le diffracteur 2, un étalement de l'énergie dans la direction antenne-diffracteur 1. Cette énergie correspond, par ordre de probabilité, (1) à la coda relative à cette hétérogénéité, (2) à des détections antérieures aux temps d'arrivées théoriques des phases liées à la

diffraction sur cette hétérogénéité et induites par l'utilisation d'une fenêtre d'observation à court-terme, (3) à une sous- ou surestimation des vitesses de propagation. Cette dernière hypothèse n'est cependant que très peu probable car l'énergie liée à ce type de détection reste très faible dans le bilan énergétique.

### 3.3.6. Conclusions

Dans la *position 2* de l'antenne, nous avons montré, qu'ici encore, l'énergie associée à la propagation des ondes depuis la source sismique jusqu'à l'antenne ne constitue pas l'énergie prépondérante des sismogrammes. De plus, la distribution énergétique, relative à chacune des hétérogénéités s'est complètement inversée. L'hétérogénéité 1 est maintenant celle qui diffracte le plus d'énergie, alors qu'elle était quasiment transparente dans les signaux calculés pour la *position 1* de l'antenne.

Le champ d'onde diffracté relatif à chacune des hétérogénéités du milieu de propagation dépend donc très largement de leur position par rapport au dispositif d'enregistrement. Cette observation sur les cas synthétiques avait déjà été faite sur des signaux réels (Gaffet, 1998), lorsque l'on s'intéressait à des groupes de séismes éclairant l'antenne d'observation selon divers azimuts. Suivant la position de l'épicentre moyen de chacun des groupes de séismes, il avait été observé que les principaux diffracteurs du milieu de propagation n'agissent pas de la même manière et avec la même force.

### 3.4. Influence du contenu spectral de la source

Nous allons à présent étudier l'influence qu'a le contenu spectral de la source sismique sur la résolution de l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde du champ d'onde diffracté. Pour modifier le contenu fréquentiel de la source, il suffit de convoluer les fonctions de Green relatives au milieu avec une fonction 'source' dont on a modifié le contenu fréquentiel. Les signaux synthétiques ont donc été recalculés pour une source qui est un Ricker de contenu spectral centré sur la fréquence 3Hz.

#### **3.4.1. Résultats de l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde**

Les résultats de la décomposition temps-fréquence-nombre d'onde sont présentés sur la Fig. 3-20 pour les composantes *NS* et *EO* calculées pour la première position de l'antenne et la Fig. 3-21 pour les composantes *NS* et *EO* calculées pour la deuxième position de l'antenne dans le milieu. Le critère du maximum d'énergie expliquée a été utilisé pour déterminer la dimension du sous-espace 'signal'.

##### **Position 1**

Pour la position 1 de l'antenne, seules trois des directions théoriques sont retrouvées dans le bilan énergétique. Les détections relatives à l'énergie diffractée par l'hétérogénéité 1 sont devenues très mineures. Concernant la configuration *NS*, cette hétérogénéité est très peu présente sur les résultats de la décomposition en nombre d'onde parce que la phase *PIS* est fortement mélangée à la phases *P2P*. Ce mélange avait déjà été mis en évidence lorsque la source avait un contenu fréquentiel voisin de 5Hz mais la séparation avait été possible. Le contenu fréquentiel est maintenant devenu trop basse fréquence pour pouvoir séparer correctement les deux phases dont les formes d'ondes sont devenues trop cohérentes. Ce mélange implique, de plus, qu'entre 12.5 et 13sec., la phases *P2P* présente une forte dispersion en azimut, accompagnée d'un biais important dans l'estimation des vitesses de propagation. Une partie de l'énergie liée à cette phase semble se propager avec une vitesse de propagation d'onde *S* alors qu'on devrait uniquement observer des détections liée à une propagation en onde *P* à travers l'antenne. Le pic de diffraction lié à cette hétérogénéité s'est également considérablement élargi, ce qui témoigne d'une résolution inférieure dans la détermination des paramètres de propagation lorsque le champ d'onde primaire devient plus basse fréquence.

FIGURE A / COMPOSANTES NS

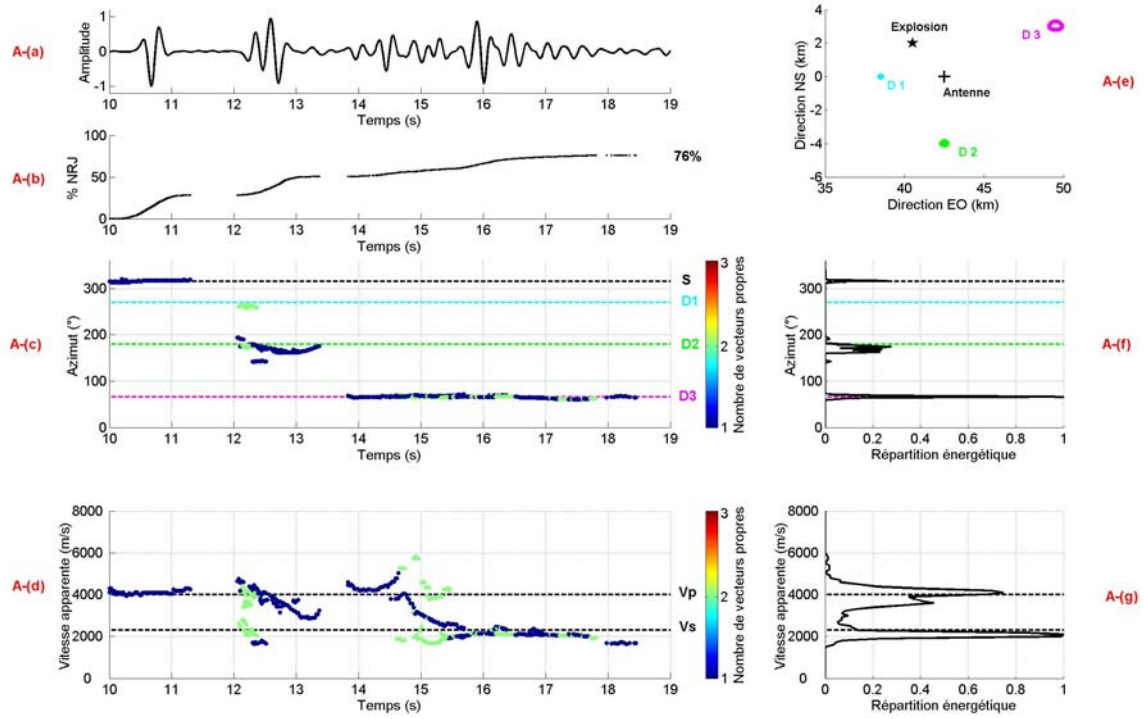


FIGURE B / COMPOSANTES EO

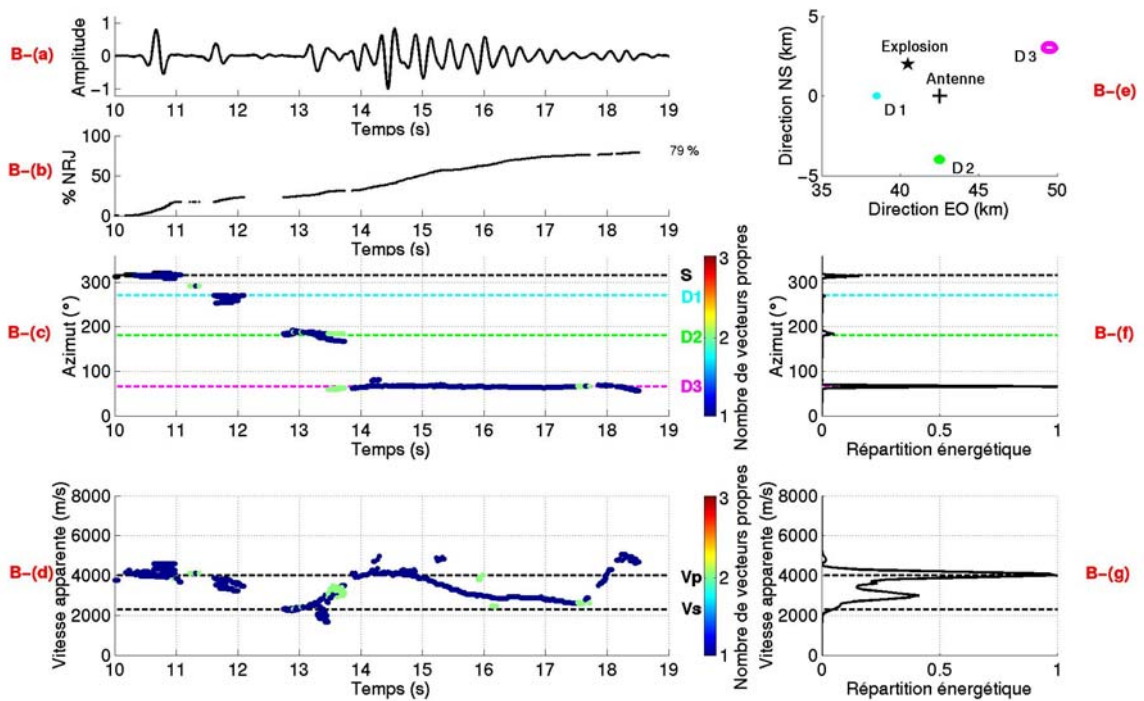


Fig. 3-20 : Les figures A et B représentent les résultats de l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde pour les composantes NS et EO respectivement lorsque le critère du maximum d'énergie a été utilisé pour sélectionner le nombre de vecteurs propres pour décrire le sous-espace 'signal'. L'antenne se situe dans la position 1 et le contenu fréquentiel de la source est maintenant égal à 3Hz.

Sur les composantes *EO*, la phase *PIS* est mieux détectée mais reste cependant d'énergie très négligeable par rapport à l'énergie diffractée par les autres hétérogénéités du milieu. De plus, sur ces composantes, on observe un biais dans la répartition énergétique des vitesses de propagation qui présente un maximum autour de 3000 m/s au lieu de 2300 m/s.

## Position 2

Concernant la deuxième configuration d'étude, les quatre directions privilégiées de l'énergie sont retrouvées, comme lorsque la fréquence dominante de la source était égale à 5Hz. Les principales phases sont décrites et comme précédemment, les phases *PIP* et *P2P* véhiculent très peu d'énergie. On peut cependant deviner la présence de la phase *P2P* peu après 12sec.. On constate que pour cette configuration, la phase *PIS* est dominante dans le bilan énergétique, et que la baisse du contenu fréquentiel de la source n'a que très peu affectée le taux d'énergie diffracté par cette hétérogénéité. La variation du contenu fréquentiel de la fonction 'source' n'a d'ailleurs pas affecté le bilan énergétique global de l'ensemble des sismogrammes.

FIGURE A / COMPOSANTES NS

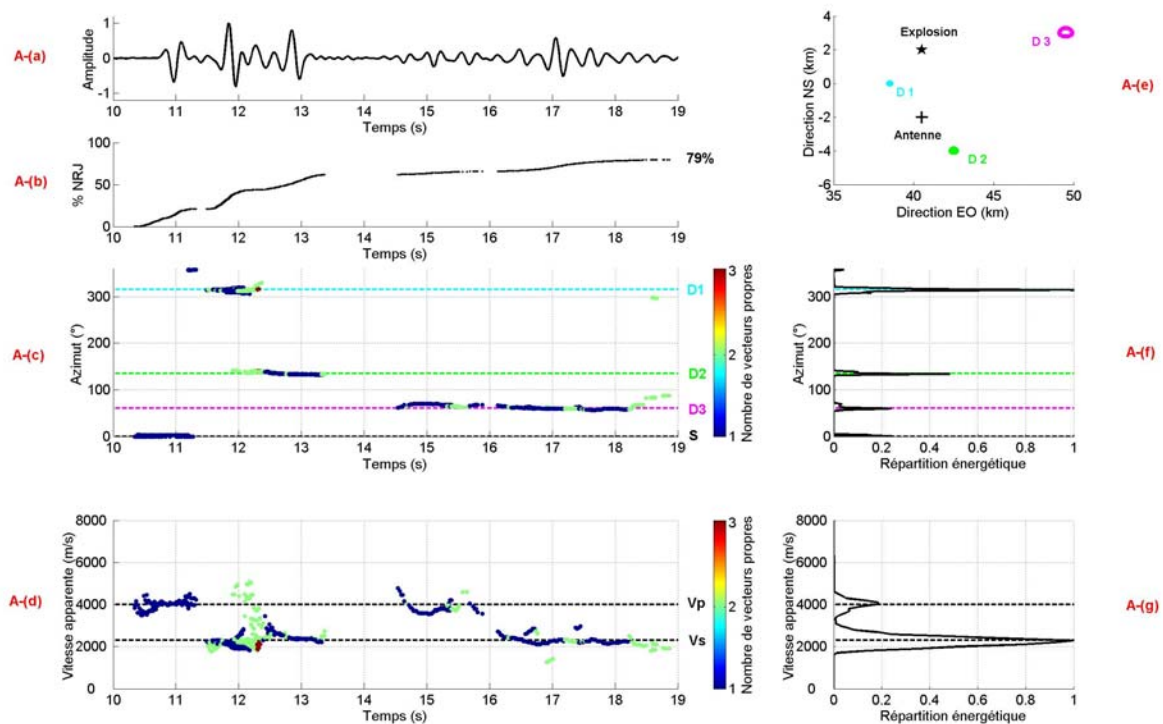


FIGURE B / COMPOSANTES EO

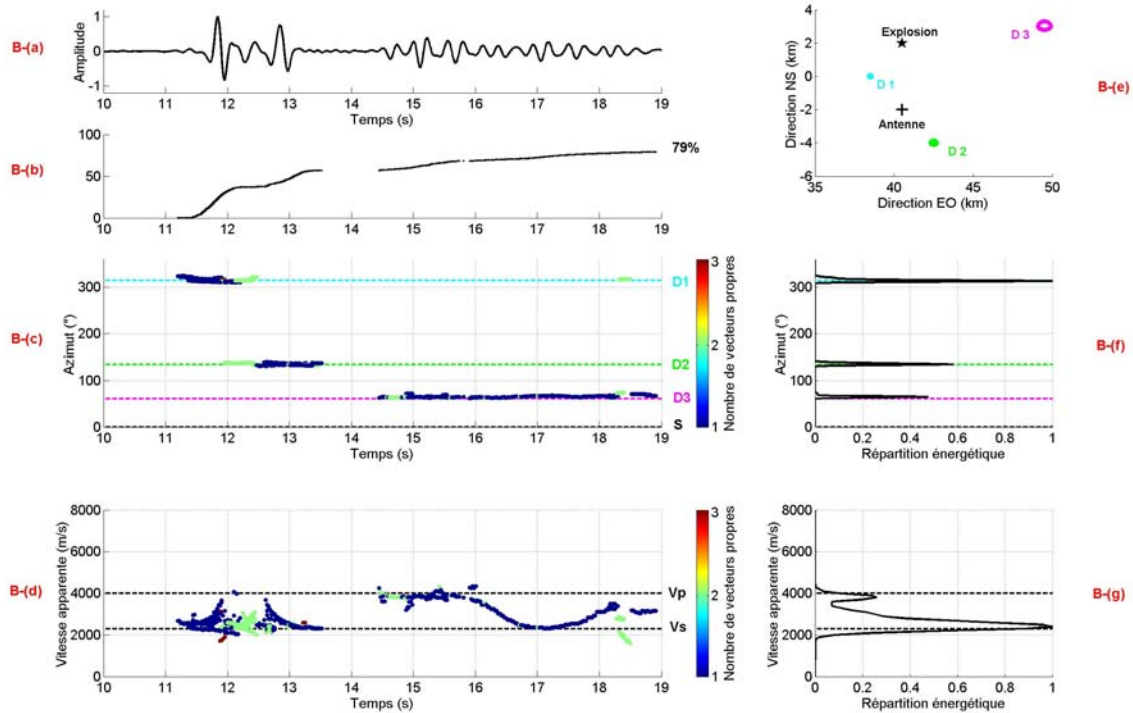
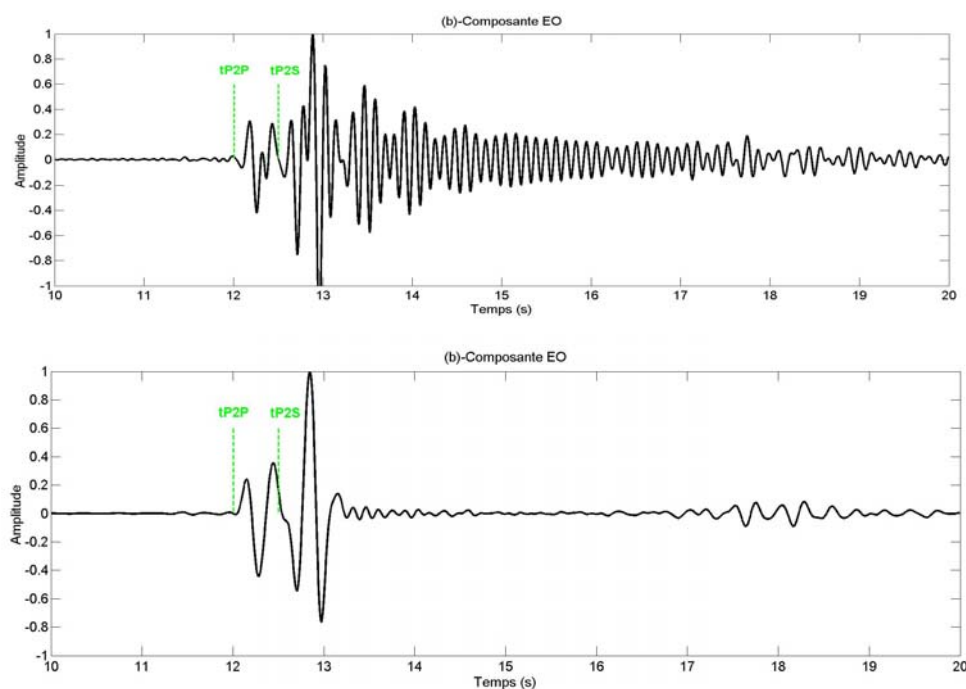


Fig. 3-21 : Les figures A et B représentent les résultats de l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde pour les composantes NS et EO respectivement lorsque le critère du maximum d'énergie a été utilisé pour sélectionner le nombre de vecteurs propres pour décrire le sous-espace 'signal'. L'antenne se situe dans la position 2 et le contenu fréquentiel de la source a été abaissé à 3Hz.

La coda générée par l'hétérogénéité 2 et qui avait été mise en évidence lorsque le contenu fréquentiel de la source était égale à 5Hz (Fig. 3-16) a complètement disparu de l'évolution temporelle des paramètres de propagation. Nous avons alors recalculé le champ d'onde diffracté lorsque seule cette hétérogénéité est présente dans le milieu de propagation et lorsque le contenu fréquentiel de la source est égale à 5 et 3Hz, respectivement. Les résultats sont présentés Fig. 3-22. On constate que lorsque le contenu fréquentiel de la source est égal à 5Hz, le champ d'onde diffracté par l'hétérogénéité 2 est constitué par une succession de phases dont l'énergie décroît doucement avec le temps. Lorsque le contenu fréquentiel de la source est égal à 3Hz, cette coda est maintenant absente des signaux calculés. A 5Hz, la longueur d'onde des signaux (460 mètres pour le champ d'onde S) était très proche de la taille caractéristique de l'hétérogénéité 2 (400 mètres). Un phénomène d'entrée en résonance du diffracteur est responsable de la génération de la coda observée à 5Hz.

Le temps d'arrivée des phases qui se propagent à travers l'antenne à partir de 17.5sec. sont compatibles avec les temps de propagation d'une phase du type *P3S2S*. Ces phases apparaissent clairement sur le champ d'onde diffracté à 3Hz, mais sont également remarquables lorsque le contenu fréquentiel de la source est égal à 5Hz.





**Fig. 3-22 : Champ d'onde diffracté par l'hétérogénéité 2, lorsqu'elle est seule présente dans le milieu de propagation et lorsque le contenu fréquentiel de la source est égal à 5 et 3Hz, respectivement.**

### 3.4.2. Bilan énergétique

Le Tableau 3-4 donne un récapitulatif de la répartition énergétique de chacun des éléments contenus dans le milieu de propagation, lorsque le contenu fréquentiel de la source est égal à 5Hz. Le Tableau 3-5 représente les mêmes quantités lorsque le contenu fréquentiel a été abaissé à 3Hz. Pour la deuxième configuration du dispositif d'enregistrement, on constate que la répartition énergétique varie très peu. L'hétérogénéité 1 diffracte cependant un peu moins d'énergie. Le taux d'énergie attribué à la source et à l'hétérogénéité 2 reste inchangé. La variation du contenu fréquentiel que nous avons imposée a pour effet d'augmenter la longueur d'onde du champ d'onde primaire. Si cette variation

avait une réelle influence sur le champ d'onde diffracté, on s'attendrait à ce que les hétérogénéités qui présentent les plus petites tailles caractéristiques diffractent moins d'énergie. Typiquement, l'hétérogénéité 1, la plus petite du milieu diffracte quasiment autant d'énergie que lorsque le champ d'onde incident avait des longueurs d'ondes plus faibles. On peut donc conclure que, dans ce cas-là, la variation du contenu fréquentiel de la source n'affecte que très peu le champ d'onde diffracté. La baisse d'énergie que nous observons est alors plutôt attribuée à la mauvaise séparation des différentes composantes ondulatoires qui se propagent simultanément à travers l'antenne, séparation qui devient de plus en plus difficile lorsque la fréquence dominante des signaux diminue.

	Energie (%) / <i><u>Position 1</u></i>	Energie (%) / <i><u>Position 2</u></i>
Source	8	4
Hétérogénéité 1	7	57
Hétérogénéité 2	16	25
Hétérogénéité 3	69	14

**Tableau 3-4 : Pourcentage d'énergie que représente le champ d'onde primaire et le champ diffractée par chacune des hétérogénéités introduites dans le milieu de propagation par rapport à l'énergie globalement contenue dans la décomposition en lignes de crêtes. Le contenu fréquentiel de la source est égal à 5Hz.**

	Energie (%) / <i><u>Position 1</u></i>	Energie (%) / <i><u>Position 2</u></i>
Source	9	6
Hétérogénéité 1	1	56
Hétérogénéité 2	20	24
Hétérogénéité 3	70	14

**Tableau 3-5 : Pourcentage d'énergie que représente le champ d'onde primaire et le champ diffractée par chacune des hétérogénéités introduites dans le milieu de propagation par rapport à l'énergie globalement contenue dans la décomposition en lignes de crêtes. Le contenu fréquentiel de la source est égal à 3Hz.**

Nous avons également représenté la répartition de l'énergie en fonction des azimuts et des vitesses de propagation, pour les *positions 1* et *2* de l'antenne. Les résultats sont présentés sur les Fig. 3-23 et Fig. 3-24. Du fait d'une séparation plus difficile des différentes phases, les paquets d'énergie sont maintenant beaucoup moins clairement identifiés. Ceci est en particulier marqué pour les résultats concernant la *position 1* de l'antenne et pour l'hétérogénéité 2.

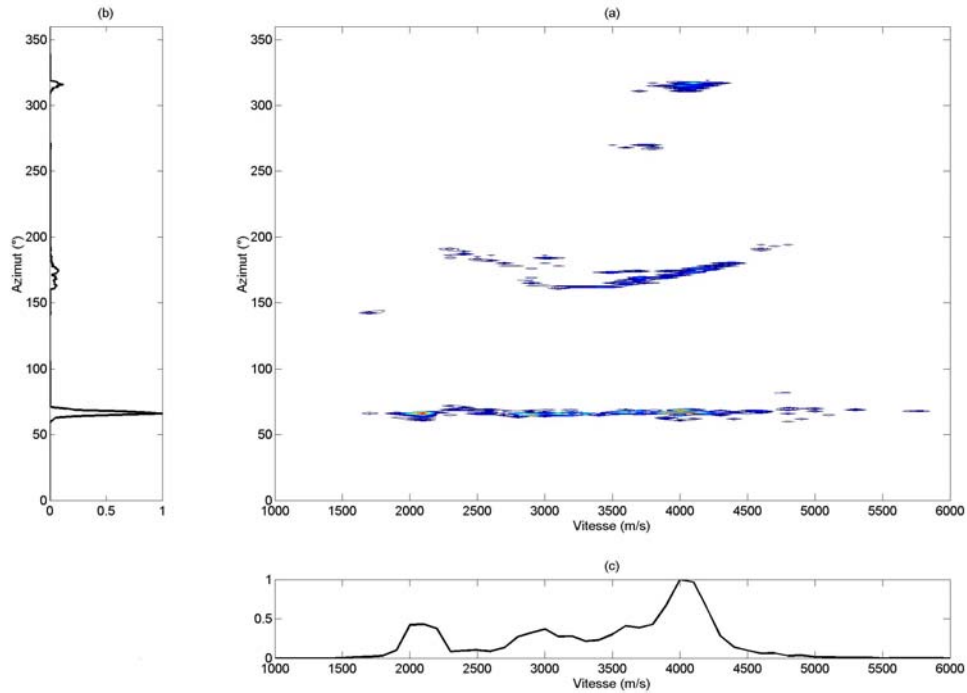


Fig. 3-23 : (a) Répartition de l'énergie expliquée sur les composantes *NS* et *EO* en fonction des directions et des vitesses de propagation. (b) Répartition de l'énergie en fonction des directions de propagation. (c) Répartition de l'énergie en fonction des vitesses de propagation. L'antenne admet la position 1 dans le milieu de propagation et le contenu fréquentiel de la source a été abaissé à 3Hz.

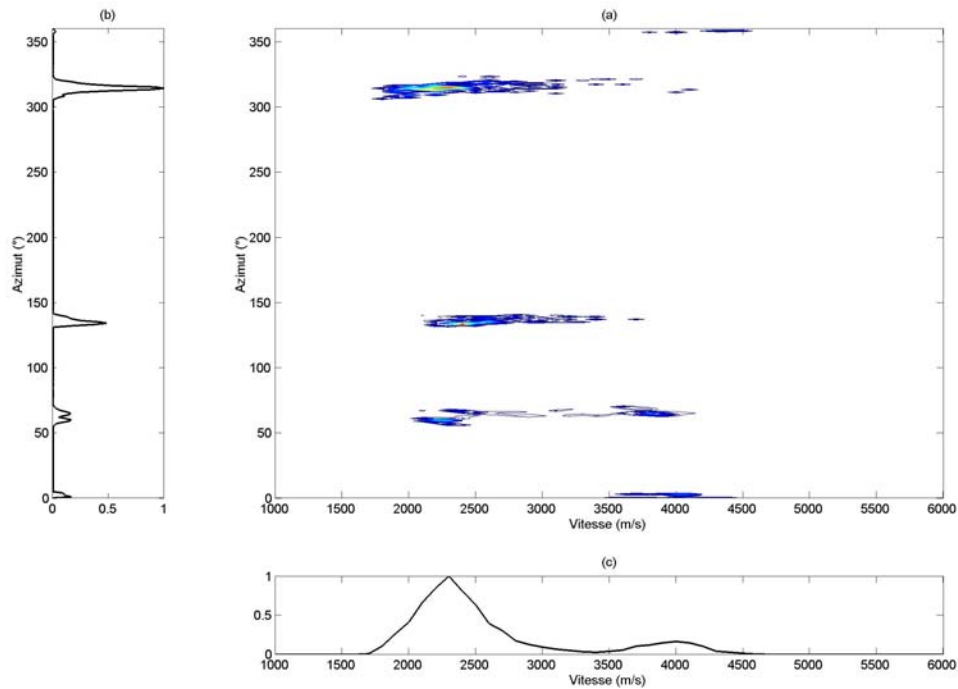


Fig. 3-24 : (a) Répartition de l'énergie expliquée sur les composantes *NS* et *EO* en fonction des directions et des vitesses de propagation. (b) Répartition de l'énergie en fonction des directions de propagation. (c) Répartition de l'énergie en fonction des vitesses de propagation. L'antenne admet la position 2 dans le milieu de propagation et le contenu fréquentiel de la source a été abaissé à 3Hz.

### 3.4.3. Inversion des paramètres de propagation

Comme précédemment, les différentes détections obtenues lors de l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde ont été inversés de manière à retrouver les zones hétérogènes du milieu de propagation. D'une manière générale, l'énergie est moins bien localisée que lorsque la fonction 'source' avait un contenu fréquentiel centré sur 5Hz. On peut ainsi mesurer la diminution de résolution de l'antenne lorsque l'on analyse des composantes du champ d'onde plus basse fréquence.

Pour la première configuration, l'hétérogénéité 1, dont les diffractions présentent très peu d'énergie, n'est pas reconstruite par l'inversion des paramètres de propagation. L'hétérogénéité 2 est localisée avec de fortes déviations azimuthales. De plus, elle est localisée à des distances plus proches de l'antenne, puisque du fait de la mauvaise séparation des composantes, on a attribué aux phases qu'elle diffracte des vitesses de propagation plus faibles que les vitesses de propagation réelles.

Pour la deuxième configuration, les résultats sont similaires à ceux obtenus lorsqu'on a étudié le cas où la source avait un contenu fréquentiel égal à 5Hz. On observe néanmoins une plus grande dispersion spatiale dans la localisation de chacune des hétérogénéités.

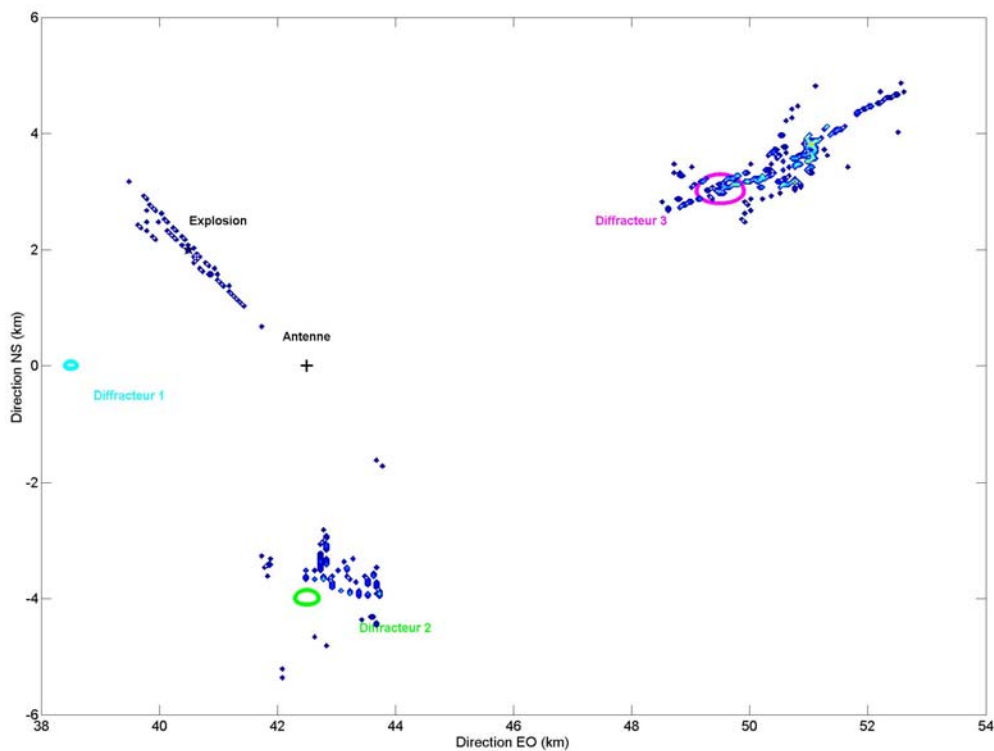


Fig. 3-25 : Reconstruction des différentes zones hétérogènes du milieu de propagation à partir des détections obtenues lors de l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde. Le milieu de propagation reconstruit est superposé au milieu de propagation théorique. L'antenne admet la position 1 dans le milieu de propagation et le contenu fréquentiel de la source a été abaissé à 3Hz.

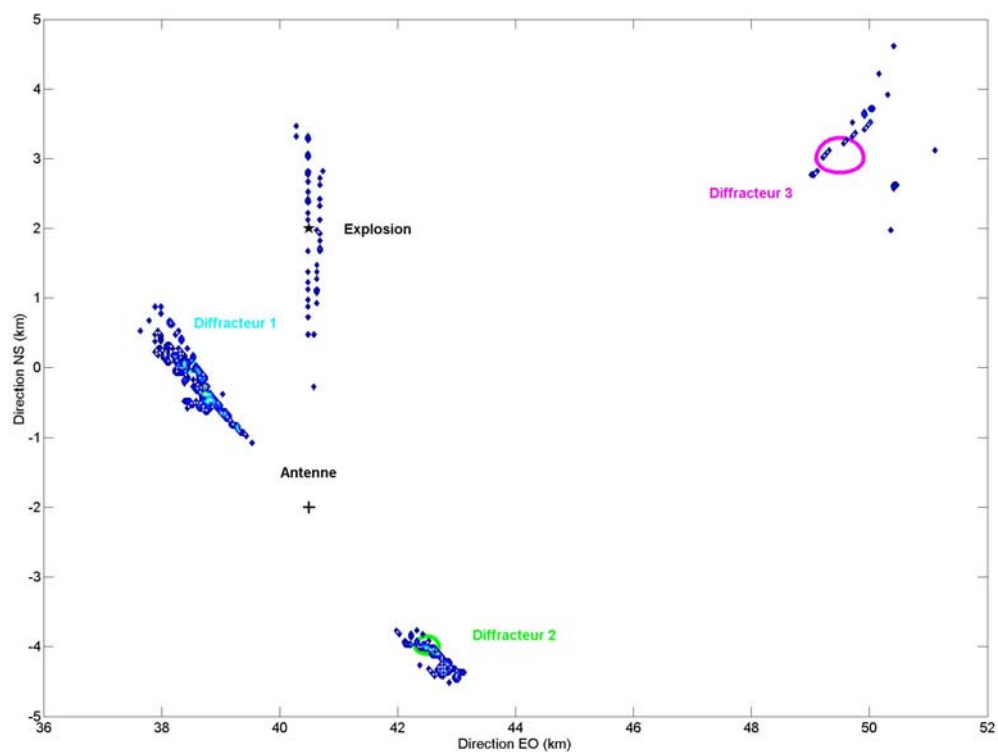


Fig. 3-26 : Reconstruction des différentes zones hétérogènes du milieu de propagation à partir des détections obtenues lors de l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde. Le milieu de propagation reconstruit est superposé au milieu de propagation théorique. L'antenne admet la position 2 dans le milieu de propagation et le contenu fréquentiel de la source a été abaissé à 3Hz.

### 3.5. Conclusions

#### ***Sur la méthodologie employée ...***

Dans ce chapitre, nous avons simulé la propagation d'un champ d'onde sismique en milieu hétérogène. Le milieu de propagation était entièrement connu, et permet donc de comparer directement les résultats de notre analyse avec ceux escomptés.

Tout d'abord, nous avons validé la méthode de décomposition temps-fréquence-nombre d'onde développée dans le chapitre II. Elle permet de caractériser les évolutions temporelles des directions et des vitesses apparentes de propagation d'un champ d'onde à travers une antenne sismologique. Nous avons montré que cette méthode de décomposition, basée sur la séparation de l'espace des données en un sous-espace '*signal*' et un sous-espace '*bruit*', est sensible aux nombres de vecteurs propres utilisés dans la description du sous-espace '*signal*'. Nous avons montré que si la prise en compte de vecteurs propres multiples permettait d'utiliser un modèle de description des signaux plus complexes, elle pouvait également s'accompagner d'un fort biais dans l'estimation des paramètres de propagation des différentes phases présentes dans les signaux. Nous avons ainsi insisté sur l'utilité d'un critère de vérification *a posteriori* de la validité des paramètres retrouvés. Ce critère est celui qui permet de choisir le nombre de vecteurs propres à introduire dans le sous-espace '*signal*' tel que les signaux reconstruits à partir des paramètres de propagation ainsi retrouvés soient les plus cohérents avec les signaux analysés. Nous avons montré que ce critère était efficace à détecter la présence de phases multiples.

L'analyse des signaux synthétiques a également montré toute la difficulté à caractériser les paramètres de propagation dès lors que plusieurs phases se propagent simultanément à travers l'antenne, situation la plus fréquemment rencontrée dans la coda des sismogrammes réels. La séparation peut alors être réalisée dans le domaine fréquentiel, lorsque les composantes sont caractérisées par des contenus fréquentiels suffisamment différents. Lorsque les composantes interfèrent aux mêmes fréquences, la séparation reste néanmoins possible dans l'espace des nombres d'onde si les paramètres de propagation ne sont pas trop voisins. Dans certains cas, nous avons observé des paramètres de propagation intermédiaires entre les paramètres de propagation théoriques, résultant d'une forte présence de termes d'interférences entre les différentes composantes. Il a ainsi été possible de tester les limites de résolution de l'antenne sismologique utilisée. En particulier, nous avons observé que cette résolution pouvait être fortement dégradée lorsque les signaux deviennent trop basse fréquence.

#### ***Sur la position de l'antenne ...***

Deux positions différentes de l'antenne sismologique ont été examinées. Tout d'abord, il est intéressant de valider des résultats, par ailleurs déjà observés sur les données réelles, qui est que le

champ d'onde diffracté peut, dans certain cas, être porteur de l'essentiel de l'énergie contenue dans les sismogrammes. Dans chacune des position d'antenne testées, la direction de la source sismique n'est pas celle selon laquelle se propage le maximum d'énergie.

Par ailleurs, nous avons mis en évidence que lorsque la position de l'antenne varie, l'énergie associée à la diffraction de chacune des hétérogénéités, en d'autres termes la visibilité des hétérogénéités présentes dans le milieu, est largement variable.

L'hétérogénéité 1, qui diffracte très peu d'énergie dans la ***position 1*** de l'antenne devient dominante lorsque cette même antenne admet la ***position 2***.

Ce dernier résultat sera important lorsque nous nous intéresserons aux résultats issus de l'expérience d'Annot. Lors de cette expérience, quatre antennes similaires ont été déployées à des distances variant entre 6 et 15km. Ces distances sont comparables à la variation de position d'antenne qui a été examinée pour les signaux synthétiques étudiés dans ce chapitre.

### ***Sur le contenu fréquentiel de la source ...***

Enfin, nous avons étudié l'influence du contenu fréquentiel de la source sur l'analyse des phases qui composent le champ d'onde diffracté. La faible variation du contenu fréquentiel que nous avons imposé à la source sismique (5Hz à 3Hz) ne modifie pas significativement l'amplitude de chacune des phases qui compose le champ d'onde diffracté. Les bilans énergétiques ne diffèrent que très peu, et ceci pour les deux positions d'antenne testées. Cependant, nous avons montré que lorsque les longueurs d'onde du champ d'onde incident devient très voisin de la taille caractéristique des hétérogénéités, ces dernières peuvent entrer en résonance pour générer une coda dont l'amplitude décroît doucement avec le temps.

Nous avons également montré que lorsque le contenu fréquentiel de la fonction source devenait plus basse fréquence, la séparation de composantes multiples qui se propagent simultanément à travers l'antenne est plus difficile. Les paramètres de propagation associés à ces phases sont alors proches dans l'espace des nombres d'ondes, les interférences entre les différentes composantes sont fortes et l'analyse en antenne n'est plus efficace à séparer les ondes. Une partie du manque de résolution est également à attribuer à la trop faible ouverture de l'antenne utilisée.

Certaines phases sont alors mal détectées et expliquent les variations observées dans les bilans énergétiques lorsque l'on passe du cas 5Hz au cas 3Hz.

### ***Sur la reconstruction du milieu de propagation***

Nous avons montré comment à partir des évolutions temps-azimut-vitesse, on pouvait reconstruire le milieu de propagation. La position des hétérogénéités a pu être retrouvée. Dans certains cas, des biais sont néanmoins présents dans la localisation des diffracteurs. Ces biais ont pu être rattachés à la complexité des signaux analytiques (propagations simultanées, présence d'une coda ...)

## ***CHAPITRE IV***

### ***APPLICATION AUX DONNEES REELLES : L'EXPERIENCE D'ANNOT***





## 4. Application aux données réelles : L'expérience d'*Annot*

L'expérience d'*Annot* (Alpes de Haute-Provence, France) a consisté à enregistrer la sismicité naturelle à l'aide de quatre antennes de capteurs et ceci durant les mois d'avril-mai 1998. Chaque antenne est composée de neuf capteurs courte-période enregistrant les vibrations du sol pour les fréquences supérieures à 0.2Hz. Son ouverture est égale à 250 mètres, avec une distance inter-capteur minimale égale à 17 mètres. La résolution ainsi que le type d'onde (contenu fréquentiel, vitesse de propagation) que permet d'étudier ce type d'antenne a déjà été décrit dans le chapitre I.

Les points centraux de chacune des antennes s'inscrivent dans un quadrilatère de côté environ égal à une dizaine de kilomètres, centré sur le village d'*Annot* (Fig. 4-1).

Le premier objectif de cette expérience est de quantifier l'influence des différentes structures géologiques présentes dans la région sur la propagation du champ d'onde incident émis lors d'un séisme. Ce champ d'onde est déformé par chacune des structures qu'il rencontre sur son chemin de propagation et génère ainsi des phases secondaires qui forment la coda des sismogrammes que nous enregistrons. Nous avons déjà montré que les analyses en antenne étaient particulièrement bien adaptées pour décrire les caractéristiques de propagation de ce type de phases. La décomposition temps-fréquence-nombre d'onde développée dans le chapitre II sera appliquée aux signaux enregistrés lors de cette expérience par chaque antenne et nous permettra de caractériser l'évolution temporelle des directions et des vitesses apparentes de propagation. L'ensemble des informations ainsi extraites des données nous permettra de proposer une localisation géographique des objets diffractants qui ont renvoyé de l'énergie dans la direction des antennes. Différents séismes, pour lesquels la position varie par rapport au dispositif global, seront examinés de manière à évaluer la variabilité des phases secondaires diffractées et donc des hétérogénéités mises en jeu, lorsqu'on modifie la façon dont le champ d'onde incident éclaire le milieu de propagation.

Le second objectif est de pouvoir observer la déformation de champ d'onde lorsqu'il se propage d'une antenne à une autre. En effet, l'originalité de l'expérience d'*Annot* réside dans le fait d'avoir déployé quatre antennes dans une zone géographique restreinte. Si les hétérogénéités situées à distances régionales du dispositif d'enregistrement global sont celles qui ont une influence prépondérante sur la propagation du champ d'onde, des signatures communes devraient être retrouvées à partir de l'analyse des signaux enregistrés par les quatre antennes. Si au contraire chaque antenne présente un comportement redondant, cela signifiera que les influences locales à chacun des sites sont prédominantes.

## 4.1. L'expérience d'Annot

### 4.1.1. Le contexte géologique

La région d'Annot se situe dans le domaine des chaînes subalpines méridionales, plus précisément dans l'arc de *Castellane*, qui représente la partie la plus externe de la chaîne alpine entre *Digne* et *Nice* (Fig. 4-1). Cette structure arquée se décompose en deux branches distinctes (Goguel, 1936) :

- la branche occidentale, qui se développe de *Digne* à *Castellane* sur une longueur de 80 kilomètres comprend des structures essentiellement orientées N-S.
- la branche méridionale, qui se développe de *Castellane* à *Nice* sur une longueur de 90 kilomètres comprend des structures essentiellement orientées E-O.

Annot, village autour duquel a été déployé l'ensemble de notre dispositif d'observation, se situe à l'intersection de ces deux branches. Cette intersection est également marquée par le faisceau de failles décrochantes NNE-SSO de *Rouaine* (Barbé, 1992) qui affectent l'ensemble de la couverture sédimentaire et vraisemblablement aussi le socle (Laurent, 1998).

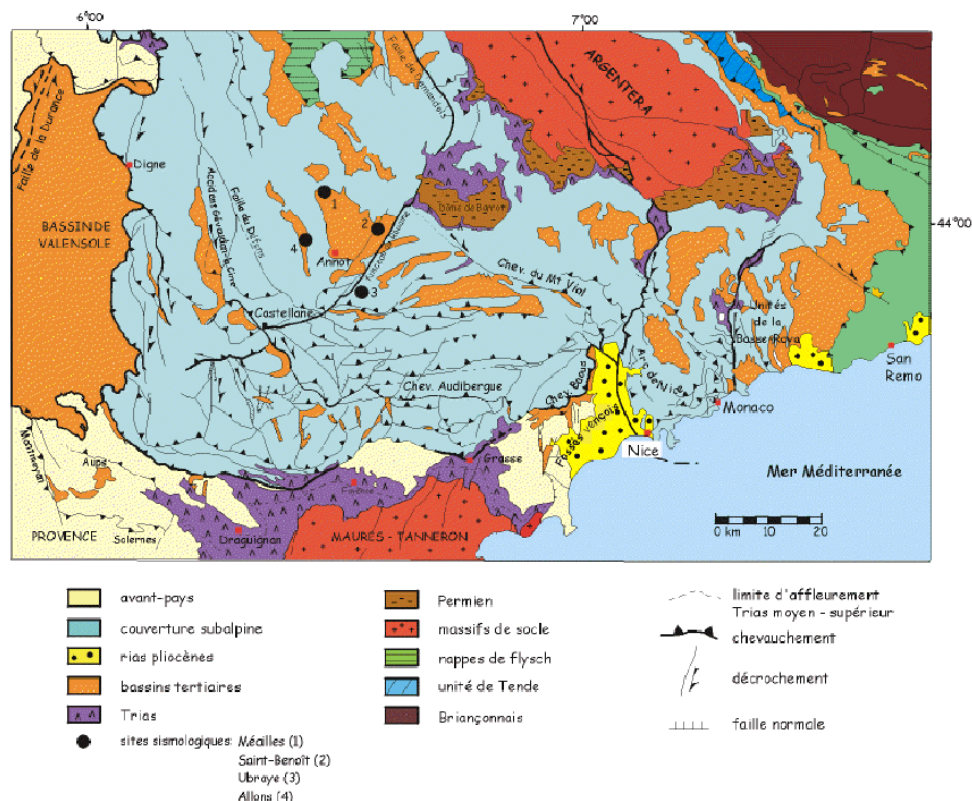
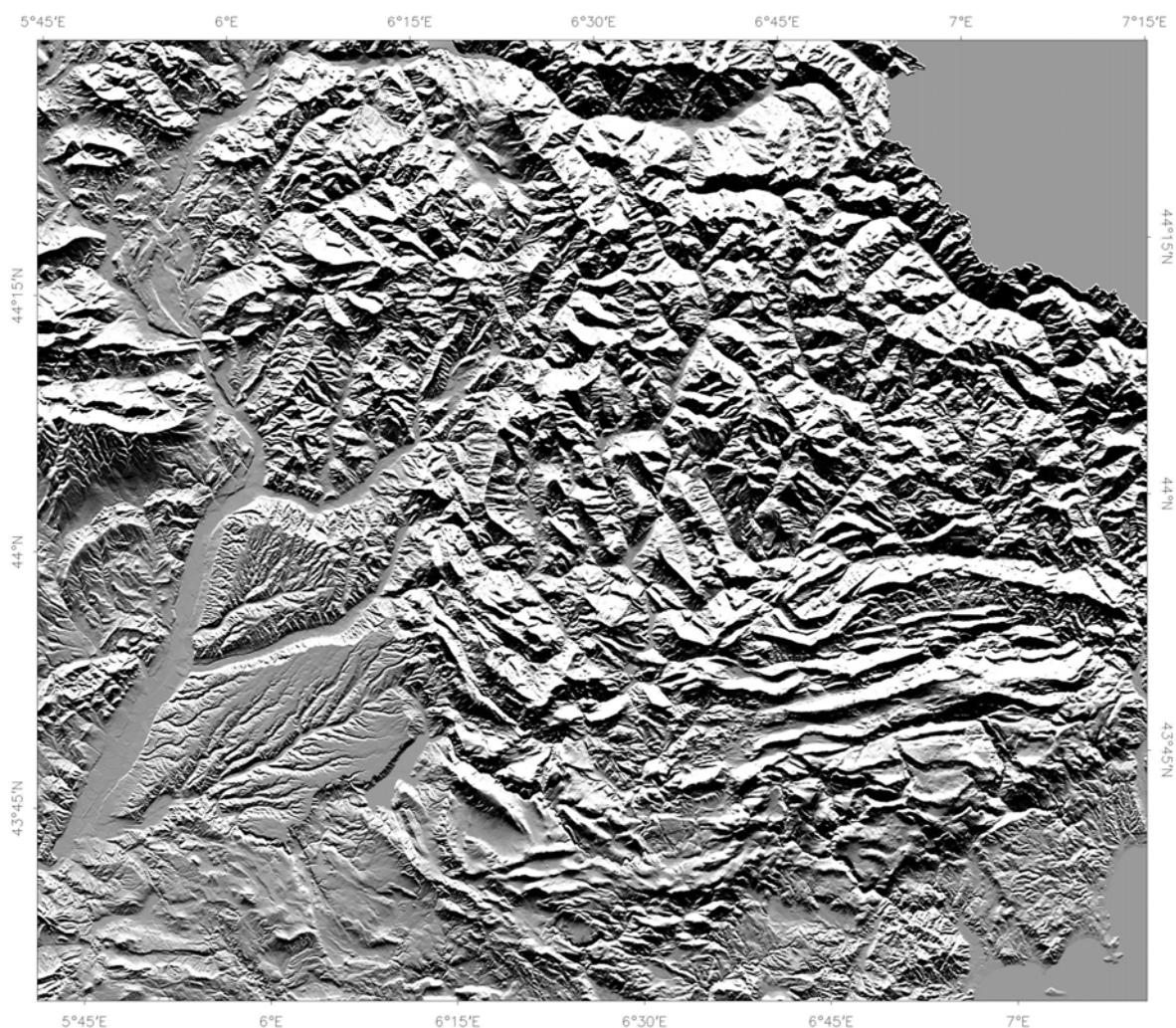


Fig. 4-1 : Carte géologique de la région d'Annot (modifiée d'après Laurent, 1998)

Les reliefs topographiques (Fig. 4-2, communication personnelle C. Larroque) sont conformes à l'orientation globale des grandes structures géologiques de la région (N-S au nord et E-O au sud).



**Fig. 4-2 : Modèle numérique de terrain de la région d'Annot, montrant l'orientation des principales structures topographiques du domaine d'étude.**

Les grandes structures géologiques présentant de forts contrastes d'impédance ou de fortes irrégularités topographiques dans notre domaine d'étude sont (Fig. 4-1) :

- à l'est, l'arc de Nice, la plus petite des chaînes subalpines.
- au nord-est, le massif cristallin de l'Argentera qui se situe à une cinquantaine de kilomètres du dispositif d'enregistrement. Le dôme du Barrot est également une structure importante de notre domaine d'étude, correspondant à une remontée du socle cristallin. Il est localisé à une dizaine de kilomètres à peine de l'antenne *Saint-Benoît*.
- à l'ouest, le bassin de Valensole (40 kilomètres) et la faille de la Durance (50 kilomètres).

- au sud, à des distances proches du dispositif d'enregistrement, une série de chevauchements orientés E-O, puis, à une soixantaine de kilomètres, le massif cristallin des Maures-Tanneron.

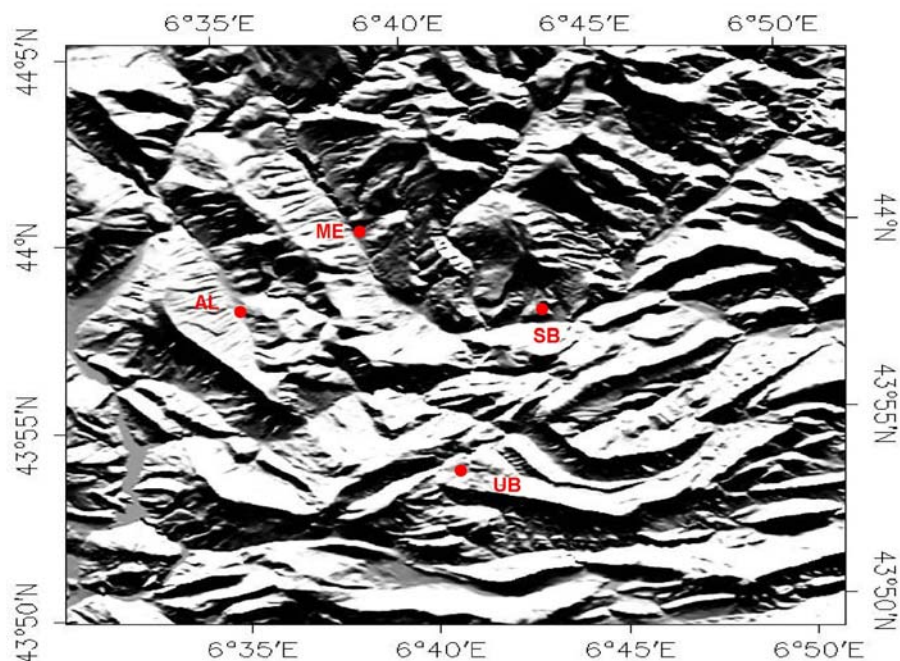
Les terrains affleurants dans cette région appartiennent à la série sédimentaire mésozoïque et cénozoïque des chaînes subalpines méridionales (lithologie constituée de grès, calcaire, marnes ). L'épaisseur de cette série est de 1000 à 2000 mètres dans notre secteur d'étude et comme partout ailleurs dans les Alpes occidentales, cette couverture sédimentaire est décollée du socle cristallin par des niveaux d'évaporites et d'argiles du Trias.

Les dernières phases de la compression alpine (50 MA) ont provoqué un raccourcissement N-S de la colonne sédimentaire, responsable de la formation, au sud du dispositif, de la série de chevauchements globalement orientés E-O qui s'enracinent dans le trias gypseux ainsi que des failles décrochantes de direction approximatives N30° et N130° (Siddans, 1979 ; Ritz, 1992).

Le fond de la plupart des vallées est recouvert par des alluvions et des colluvions dont l'épaisseur peut atteindre quelques dizaines de mètres. Ceux-ci sont déposés au cours du Quaternaire, ils sont peu consolidés et présentent de ce fait un fort contraste rhéologique avec les séries sous-jacentes (Kerkhove, 1976 ; Campredon, 1980).

#### **4.1.2. Le choix des sites**

Le dispositif global formé par les quatre antennes déployées lors de cette campagne est centré sur le village d'*Annot*. Environ une dizaine de kilomètres séparent chacun de ces sites. Les noms qui leurs sont associés sont '*Méailles*', '*Allons*', '*Saint-Benoît*' et '*Ubraye*'. Ces sites sont marqués par des points rouges sur la Fig. 4-3 présentant le modèle numérique de terrain local au dispositif d'enregistrement.



**Fig. 4-3 : Modèle numérique de terrain montrant la localisation géographique de chacune des antennes. Les points rouges représentent ces localisations pour les antennes *Méailles*, *Allons*, *Saint-Benoît* et *Ubraye*.**

On a choisi d'implanter l'ensemble du dispositif dans cette région car les grandes structures géologiques et topographiques qui y sont présentes sont relativement bien connues (4.1.1). Il est donc intéressant de déterminer dans quelle mesure chacune des structures identifiées dans la région affecte la propagation du champ d'onde. Les antennes *Méailles*, *Allons* et *Saint-Benoît* sont implantées dans la partie nord, où l'orientation des structures géologiques et topographiques est N-S et *Ubraye* a été déployé dans la partie sud, où l'orientation de ces structures est E-O. L'antenne *Allons* repose dans un fond de vallée, celle de *Méailles* et de *Saint-Benoît* sur des versants topographiques et *Ubraye* repose sur un plateau sommital surélevé de quelques 300 mètres (Fig. 4-3). L'altitude de ce plateau est d'environ 1000 mètres. Les différences observées entre les signaux enregistrés par chaque antenne pour un même événement pourront alors également être mises en relation avec le contexte géologique et structural local, propre au site où chaque antenne a été déployée.

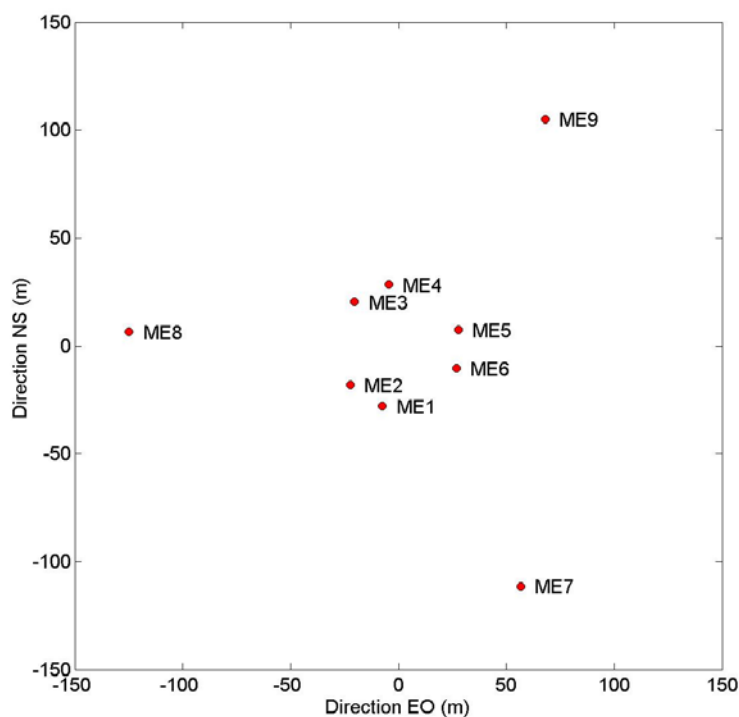
Enfin, le choix d'implémenter le dispositif dans cette région a également été guidé par l'activité sismique modérée qui garanti un apport de données suffisant en seulement quelques semaines d'observation.

#### **4.1.3. Le jeu de données**

La campagne d'*Annot* a permis d'enregistrer un ensemble de 300 séismes, parmi lesquels une centaine d'événements présente un rapport signal sur bruit suffisamment fort pour qu'une analyse

puisse être envisagée. Dans ce travail, nous avons retenu les séismes dont les épicentres sont localisés à des distances locales du dispositif global formé par les quatre antennes. Le séisme le plus lointain est ainsi localisé à Gardanne, à 120 kilomètres du dispositif global. En effet, la très faible ouverture ne nous permet pas de caractériser des phases sismiques qui se propagent à travers l'antenne avec des angles d'incidence trop proches de la verticale (et par conséquent des vitesses apparentes trop élevées), et qui ont traversé des zones profondes du globe terrestre. Nous ne nous intéresserons principalement qu'aux ondes qui se sont propagées dans la croûte terrestre supérieure.

De plus, nous n'avons sélectionné que les séismes pour lesquels au moins six capteurs de chaque antenne, ont été opérationnels durant le passage des ondes. Nous avons représenté sur la Fig. 4-4 les neuf capteurs de l'antenne *Méailles*. Trois capteurs (*ME7*, *ME8* et *ME9*) forment la partie externe du dispositif et trois paires de capteurs (*ME1* et *ME2*, *ME3* et *ME4*, *ME5* et *ME6*) forment la partie interne.



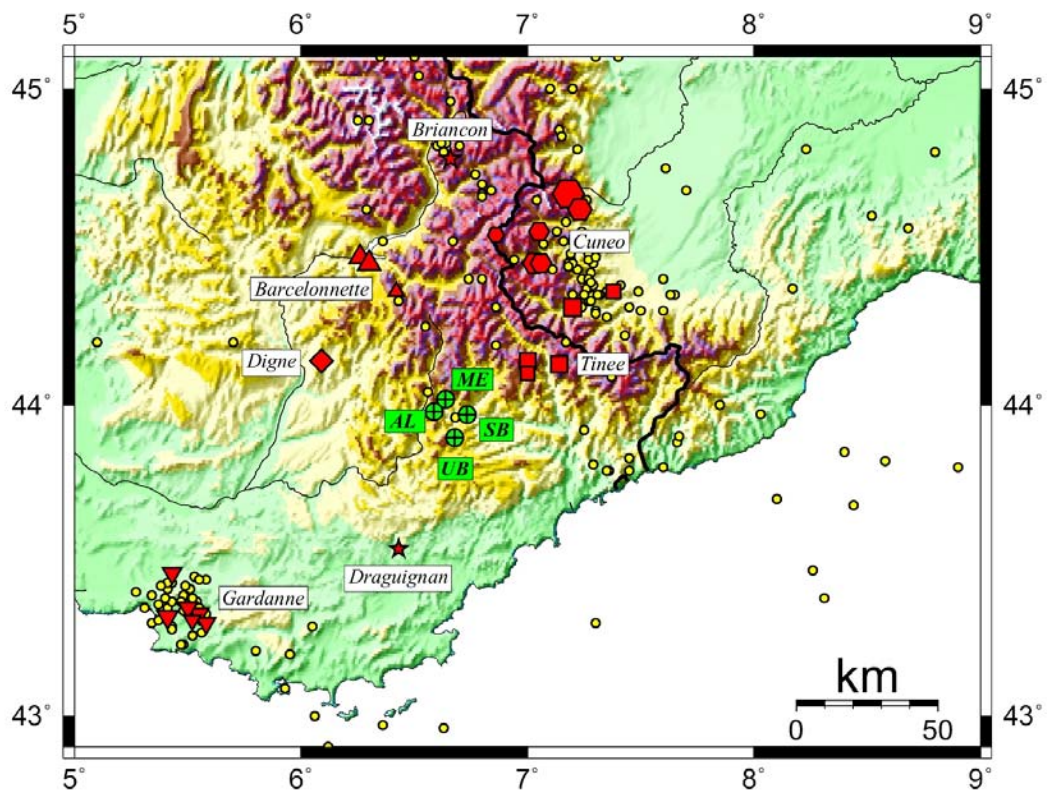
**Fig. 4-4 : Configuration géométrique de l'antenne déployée à *Méailles*.**

Lorsque l'antenne admet un fonctionnement optimal, cela signifie que tous les capteurs de l'antenne ont enregistré le signal sismologique. Cependant, dans certains cas, les conditions expérimentales de terrain conduisent à un dysfonctionnement de certains capteurs. L'utilisation des capteurs extérieurs étant primordiale dans la bonne détermination des paramètres de propagation, nous ne retiendrons que les événements pour lesquels au moins deux des capteurs externes ont fonctionné. Par ailleurs, nous n'avons pas retenu les événements lorsque moins de six capteurs ont enregistré le passage des ondes.



Les quatre antennes déployées à *Annot* admettent des configurations géométriques similaires ; ce principe de sélection sera donc adopté pour chacune des antennes.

De l'ensemble des événements enregistrés durant l'expérience d'*Annot*, nous avons finalement retenu un ensemble de 23 séismes. En fonction de leurs localisations géographiques, ces événements ont été repartis en huit groupes différents, appelés *Gardanne*, *Barcelonnette*, *Tinée-Cuneo* (Tinée + Cuneo, regroupe l'ensemble des événements localisés dans une direction N-E par rapport au dispositif d'enregistrement), *Draguignan*, *Briançon* et *Digne* (voir Tableau 4-1 pour un inventaire des différents événements et Fig. 4-5 pour leurs localisations géographiques).



**Fig. 4-5 : Localisation géographique de tous les événements enregistrés à distance régionale (<200km) pendant la campagne d'*Annot* (points jaunes). Les figurés rouges représentent les événements que nous avons sélectionnés pour notre étude, répartis dans les groupes *Gardanne*, *Barcelonnette*, *Tinée-Cuneo*, *Draguignan*, *Briançon* et *Digne*. Les points verts représentent la localisation des quatre antennes *Méailles* (ME), *Allons* (AL), *Saint-Benoît* (SB) et *Ubraye* (UB).**

Les différents événements sont repartis autour du dispositif d'enregistrement global, depuis la direction N200° (groupe *Draguignan* puis *Gardanne*), jusqu'à la direction N60° (groupe *Tinée*). Aucun séisme localisé au S-E du dispositif n'a pu être analysé, en raison de leur trop faible rapport signal sur bruit.



Date	Prof.	ML.	Lat.	Long.	Dist. (km)	Back-Azimet (°)
<b>Groupe Gardanne</b>						
<i>Gardanne1</i> /1998/04/16	1.0	3.0	43.43	5.46	113	ME / 236 – AL / 236 – SB / 240 - UB / 243
<i>Gardanne2</i> /1998/04/27	0.0	2.3	43.46	5.43	114	ME / 238 – AL / 139 – SB / 242 - UB / HS
<i>Gardanne3</i> /1998/04/15	1.0	3.1	43.44	5.44	120	ME / 234 – AL / 235 – SB / 239 - UB / 241
<i>Gardanne4</i> /1998/05/18	1.0	3.0	43.43	5.40	123	ME / 233 – AL / 234 – SB / 238 - UB / 240
<i>Gardanne5</i> /1998/05/08	5.0	2.8	43.32	5.41	122	ME / 232 – AL / 233 – SB / HS - UB / 238
<i>Gardanne6</i> /1998/05/15	4.0	2.0	43.34	5.48	118	ME / 231 – AL / 232 – SB / 236 - UB / 238
<b>Groupe Barcelonnette</b>						
<i>Barcelonnette1</i> /1998/05/13	3.0	2.9	44.47	6.26	64	ME / 329 – AL / 335 – SB / 326 - UB / 332
<i>Barcelonnette2</i> /1998/05/13	5.0	3.1	44.45	6.30	60	ME / 331 – AL / 336 – SB / 327 - UB / 334
<i>Barcelonnette3</i> /1998/04/15	2.0	2.5	44.40	6.40	52	ME / 336 – AL / 342 – SB / 331 - UB / 338
<b>Groupe Tinée-Cuneo</b>						
<i>Tinée-Cuneo1</i> /1998/04/11	2.0	4.0	44.60	7.30	84	ME / 34 – AL / 34 – SB / 35 - UB / HS
<i>Tinée-Cuneo2</i> /1998/05/27	2.0	2.3	44.45	7.03	62	ME / 33 – AL / 29 – SB / 20 - UB / HS
<i>Tinée-Cuneo3</i> /1998/04/22	4.0	2.6	44.60	7.30	85	ME / 37 – AL / HS – SB / 32 - UB / HS
<i>Tinée-Cuneo4</i> /1998/04/25	-1.0	1.3	44.54	6.86	61	ME / 17 – AL / HS – SB / HS - UB / HS
<i>Tinée-Cuneo5</i> /1998/05/21	2.0	2.1	44.55	7.05	68	ME / 29 – AL / HS – SB / HS - UB / HS
<i>Tinée-Cuneo6</i> /1998/05/27	9.0	2.3	44.45	7.06	61	ME / 35 – AL / 36 – SB / 26 - UB / HS
<i>Tinée-Cuneo7</i> /1998/05/11	2.0	2.5	44.13	7.00	34	ME / 66 – AL / 62 – SB / 50 - UB / 45
<i>Tinée-Cuneo8</i> /1998/05/01	2.0	2.3	44.30	7.30	63	ME / 59 – AL / 58 – SB / 51 - UB / 48
<i>Tinée-Cuneo9</i> /1998/04/16	10.0	2.6	44.13	7.14	42	ME / 73 – AL / 69 – SB / 61 - UB / HS
<i>Tinée-Cuneo10</i> /1998/04/28	16.0	2.1	44.36	7.38	70	ME / 57 – AL / HS – SB / HS - UB / HS
<i>Tinée-Cuneo11</i> /1998/05/16	2.0	1.8	44.10	7.00	42	ME / 73 – AL / 70 – SB / 62 - UB / 55
<b>Groupe Digne</b>						
<i>Digne1</i> /1998/05/06	4.0	3.2	44.1	6.1	47	ME / 282 – AL / 289 – SB / 286 - UB / 296
<b>Groupe Draguignan</b>						
<i>Draguignan1</i> /1998/04/14	0.0	1.7	43.54	6.43	51	ME / 197 – AL / 195 – SB / 207 - UB / 206
<b>Groupe Briançon</b>						
<i>Briançon1</i> /1998/05/11	2.0	2.9	44.8	6.7	93	ME / 3 - AL / 6 - SB / 358 - UB / 1

**Tableau 4-1 : Caractéristiques des différents événements étudiés et localisés sur la carte Fig. 4-5.**

## 4.2. Résultats des décompositions temps-fréquence-nombre d'onde

La méthode de décomposition développée dans le chapitre II a été appliquée à l'ensemble des événements sélectionnés précédemment.

La première partie de cette section '*résultats*' montre la stratégie complète de la méthode lorsqu'elle est appliquée à l'analyse de données réelles. Les résultats de la décomposition temps-fréquence-nombre d'onde seront présentés pour l'analyse d'un événement particulier enregistré pendant l'expérience d'*Annot* par les quatre antennes. Cette première partie constitue donc un apprentissage méthodologique de la façon systématique avec laquelle nous avons analysé l'ensemble du jeu de données réelles.

La deuxième partie de cette section présente les résultats obtenus pour l'ensemble des 23 séismes analysés. Dans un premier temps, les informations recueillies à partir des 4 antennes seront globalisées. La technique de reconstruction qui nous avait permis, dans le chapitre III, de localiser les zones hétérogènes du milieu de propagation, sera globalement appliquée aux évolutions temps-azimuts-vitesses décrivant chaque séisme enregistré par les différentes antennes. Dans un second temps, nous affinerons notre analyse, en décrivant la variabilité des zones hétérogènes mise en évidence lorsque l'on considère séparément les informations recueillies par chaque antenne.

La dernière partie est une analyse encore plus détaillée du comportement du champ d'onde incident dans le milieu, puisque nous nous attacherons à décrire les domaines géographiques explorés par les ondes émises lors du séisme en fonction de la position de son hypocentre et donc de son appartenance à l'un des différents groupes d'événements que nous avons présentés précédemment.



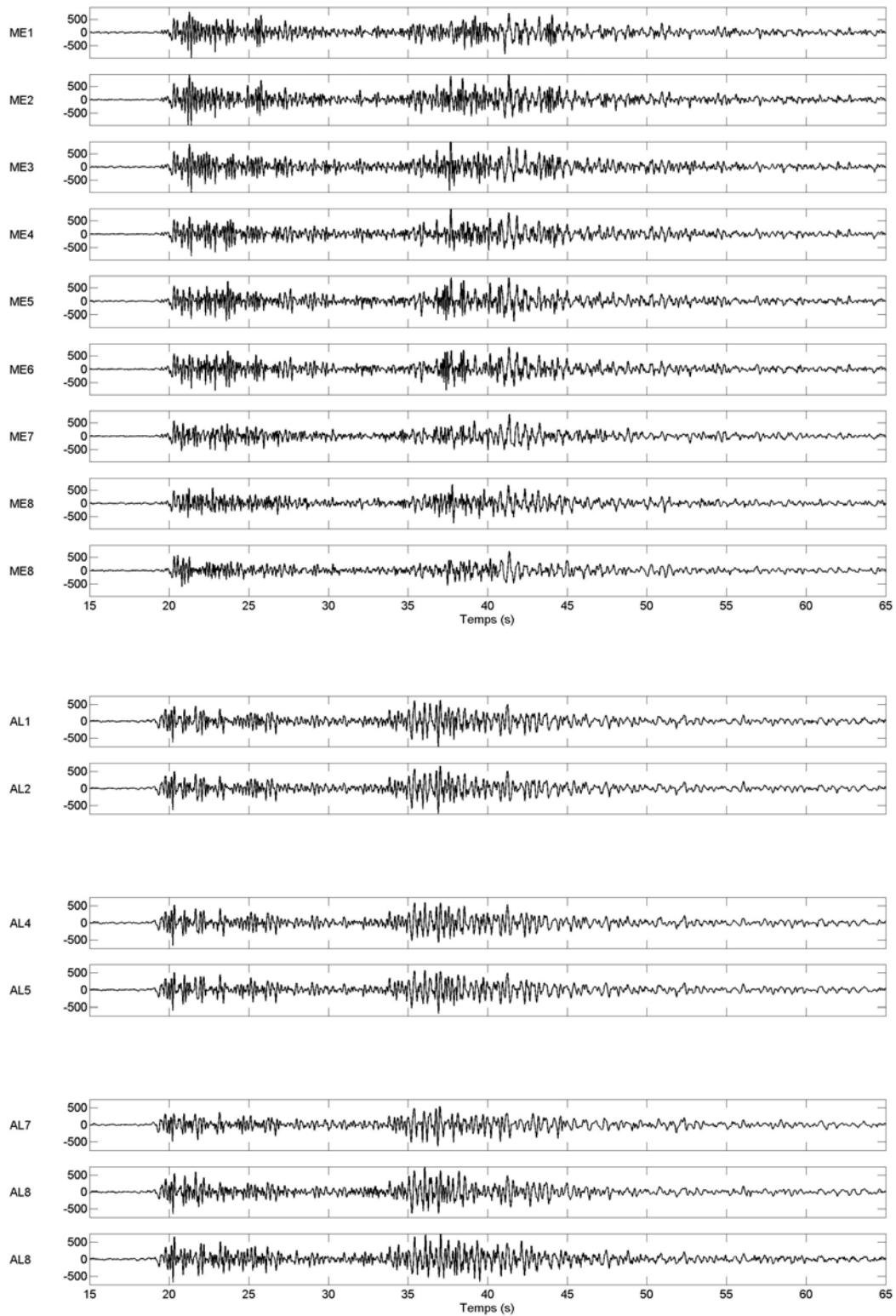
#### 4.2.1. Stratégie de traitement

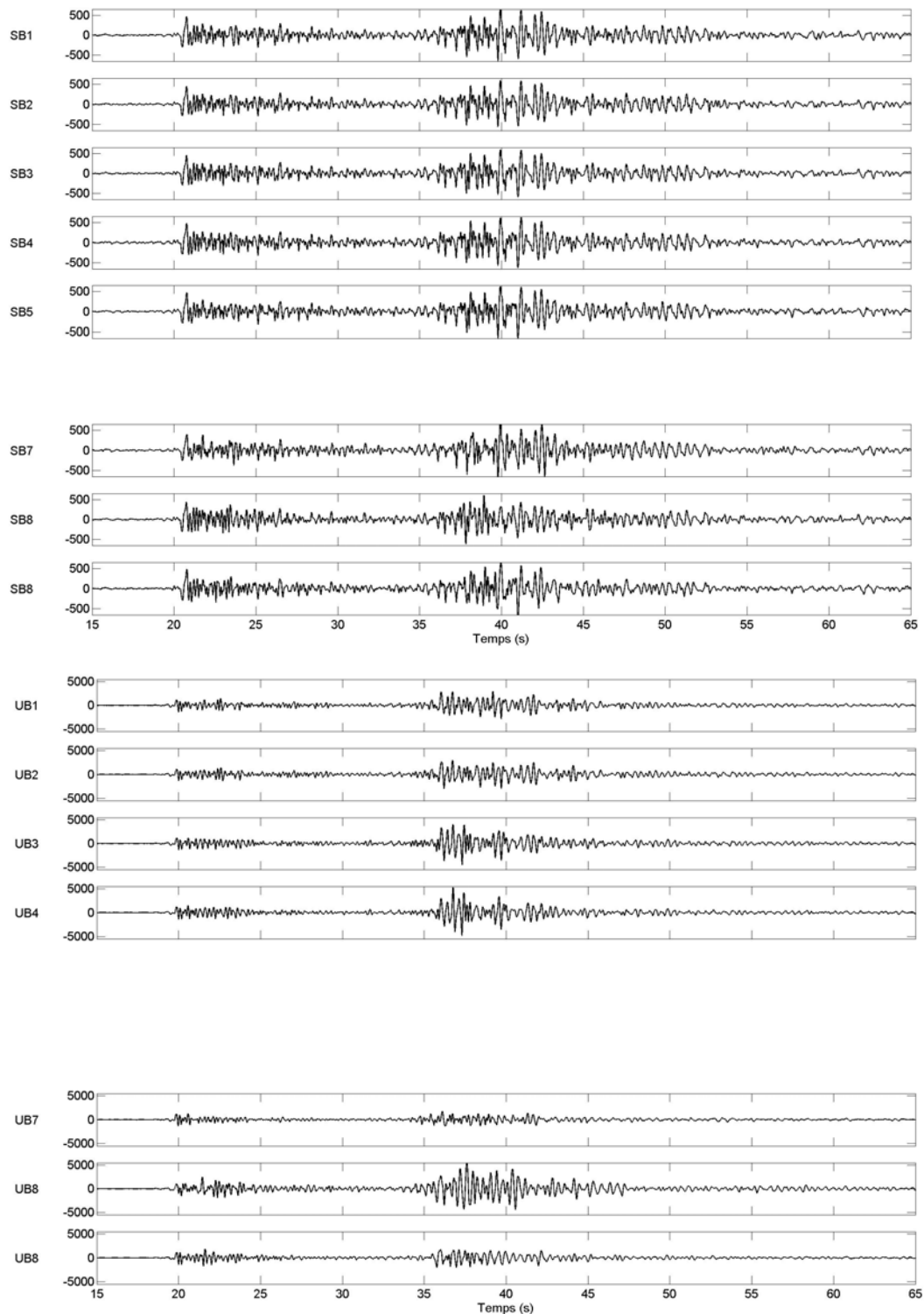
Nous avons choisi de détailler l'analyse d'un événement particulier appartenant au groupe *Gardanne*. Tous les événements appartenant à ce groupe ont une origine anthropique puisqu'ils sont des conséquences de l'exploitation des mines de *Gardanne*. L'événement que nous avons sélectionné est *Gardanne1* (voir Tableau 4-1 et Fig. 4-5). Il est localisé à une distance moyenne de 113 kilomètres et sa profondeur a été estimée à 1 kilomètre. La magnitude de cet événement est égale à 3.0.

Les différents paramètres concernant la localisation, la magnitude et l'heure origine des différents séismes analysés sont extraits des bulletins sismologiques publiés par le *LDG* (CEA, Bruyères-le-Châtel), le *Renass* (IPG, Strasbourg), *Sismalp* (LGIT, Grenoble) ainsi que l'*IGN* (Rome).

##### *Les signaux*

Les signaux sont présentés **Fig. 4-6**. Seule l'antenne *Méailles* a présenté un fonctionnement optimal. Sur les trois autres antennes, on constate que les signaux enregistrés par certains capteurs ne seront pas utilisables pour l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde, soit parce que certaines stations d'acquisition n'ont pas fonctionné au moment du passage des ondes (*SB6* ou *UB6* par exemple), soit parce que le signal enregistré par certains capteurs présente un rapport signal sur bruit trop faible. Une préparation des données doit donc être réalisée pour chaque événement visant à ne sélectionner que les traces utilisables pour l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde. Pour l'événement *Gardanne1*, *AL3* et *AL6*, *SB6*, *UB5* et *UB6* ne seront pas utilisés.





**Fig. 4-6 : Événement *Gardanne1* enregistré par les antennes *Méailles*, *Allons*, *Saint-Benoît* et *Ubraye*. Les capteurs *AL3* et *AL6* (*Allons*), *SB6* (*Saint-Benoît*) *UB5* et *UB6* (*Ubraye*) ne seront pas utilisés pour l'analyse. Les signaux sont filtrés entre 1 et 10Hz.**

Les signaux enregistrés sur chaque antenne ont été filtrés entre 1 et 10 Hz. Alors que les signaux enregistrés par *Méailles*, *Allons* et *Saint-Benoît* présentent des amplitudes comparables, ceux enregistrés par l'antenne *Ubraye* sont fortement amplifiés, de l'ordre d'un facteur 10. De plus, pour

cette dernière antenne, on observe des variations importantes de l'amplitude des signaux (*UB7* et *UB8* par exemple), témoignant de la présence d'un effet de site local, au sein même de l'antenne.

D'une manière générale, et ceci est vrai pour chaque antenne, les signaux enregistrés par les capteurs formant la partie interne du dispositif présentent une meilleure cohérence des formes d'onde que ceux enregistrés par les capteurs externes.

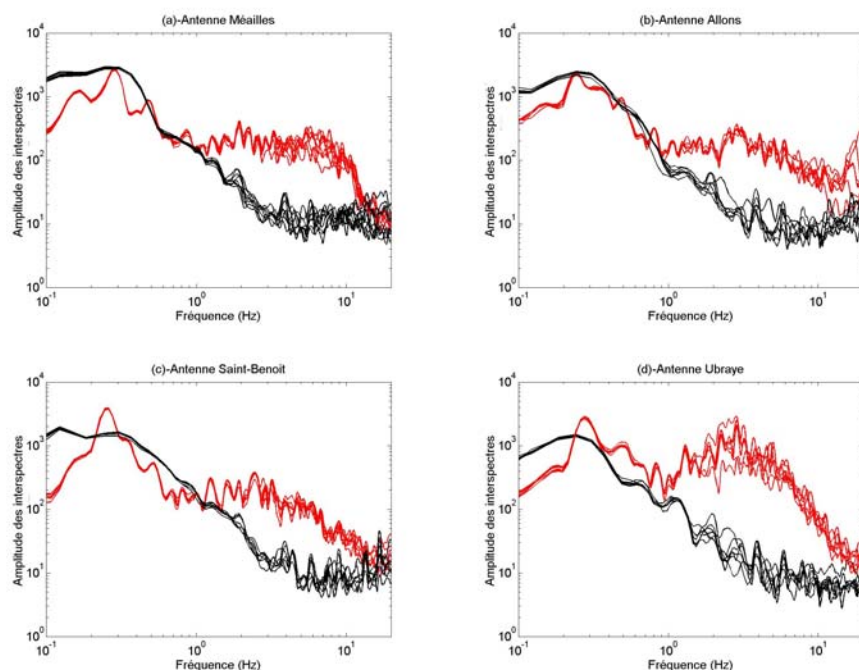
On remarque que malgré la faible distance qui sépare les différentes antennes (10-15 kilomètres), nous ne sommes pas en mesure de suivre la propagation d'une phase sismique donnée, d'une antenne à l'autre, en dehors des phases canoniques  $P_n$ ,  $P_g$ ,  $S_n$ ,  $S_g$ . Ceci montre que le milieu traversé par les ondes depuis l'hypocentre jusqu'à chaque antenne est différent et confirme que le milieu global traversé par les ondes est très complexe. De plus, la signature régionale enregistrée par les ondes au cours de leur propagation depuis la source jusqu'aux antennes peut être modifiée, voire dans un cas extrême comme à *Ubraye*, être masquée par la signature locale. Cette influence locale pourrait également expliquer la non-cohérence entre les différentes formes d'onde observées d'une antenne à l'autre.

### ***Décompositions temps-fréquence***

La première étape de l'analyse consiste à calculer la décomposition temps-fréquence globale associée à chaque événement. Nous avons déjà montré (section 3.2.4, chapitre II) que les décompositions temps-fréquence relatives aux différents signaux enregistrés par une même antenne présentent une grande variabilité. Dans le but d'extraire les zones temps-fréquence les plus énergétiques, communes à l'ensemble des signaux enregistrés par une antenne, nous avons alors proposé de calculer une décomposition globale en lignes de crêtes (section 3.2.1, chapitre II).

Il reste à déterminer la gamme de fréquence dans laquelle chacune de ces décompositions sera calculée, c'est-à-dire la gamme de fréquence dans laquelle les signaux présentent un rapport signal sur bruit suffisamment élevé. Dans ce but, nous avons calculé les spectres d'énergie des signaux enregistrés par chacune des antennes. Pour l'événement *Gardanne1*, ces spectres ont été calculés pour chaque signal, entre 20 et 55sec. et ont été superposés Fig. 4-7-(a,b,c,d) (courbes rouges). Nous n'analyserons que les gammes de fréquences pour lesquelles le rapport signal sur bruit est supérieur à 3. Les courbes noires correspondent à trois fois l'énergie des spectres du bruit de fond ambiant, enregistré par chacune des antennes une vingtaine de secondes avant le passage des premières ondes sismiques. Les variations d'amplitudes observées entre les différentes antennes se retrouvent sur les spectres d'énergie. Pour l'antenne *Ubraye*, les fréquences comprises entre 1 et 5Hz sont fortement amplifiées. Par ailleurs, les spectres relatifs au bruit de fond ambiant présentent des amplitudes comparables sur les quatre antennes.

- La fréquence minimale d'étude sera choisie en déterminant celle pour laquelle (i) le signal présente au moins un rapport signal sur bruit supérieur à trois et (ii) le bruit ne présente plus aucune cohérence à l'échelle de l'antenne. Le niveau moyen de cohérence a été calculé pour les 20sec. de bruit de fond enregistré juste avant le passage des toutes premières ondes. Ce calcul a montré que le bruit présente une cohérence proche de 1 pour les fréquences inférieures à 1Hz. Les mêmes caractéristiques ont été observées sur les quatre antennes.  
Pour l'événement *Gardanne1*, la fréquence minimale d'étude est donc égale à 1Hz, quelle que soit l'antenne considérée.
- La fréquence maximale d'étude sera choisie en déterminant celle pour laquelle une diminution est observée dans le spectre d'énergie des signaux. Pour l'événement *Gardanne1*, la fréquence maximale que nous considérerons varie d'une antenne à une autre. Pour les antennes *Méailles*, *Allons* et *Saint-Benoît*, nous avons fixé cette fréquence à 10Hz, alors que pour l'antenne *Ubraye*, nous avons choisi comme fréquence maximale d'étude, celle pour laquelle une forte diminution d'énergie est observée, c'est-à-dire 5Hz.

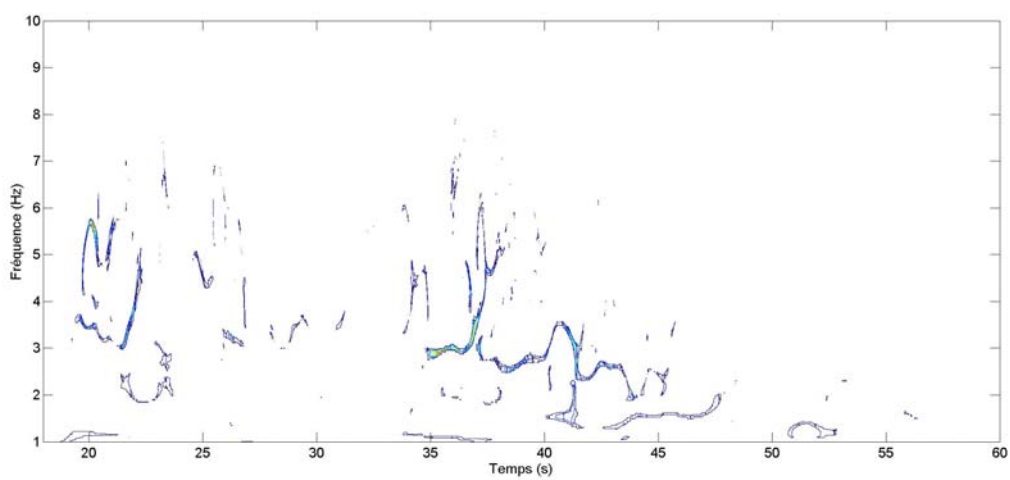
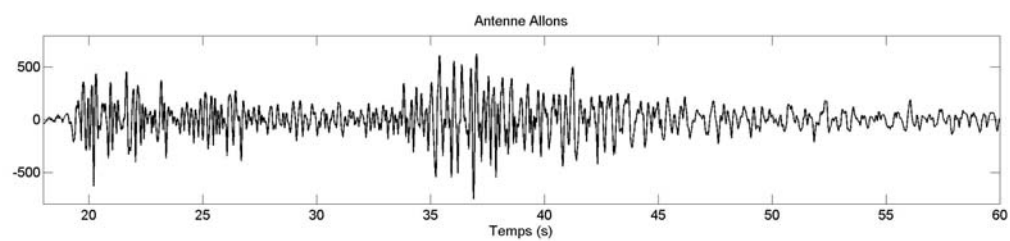
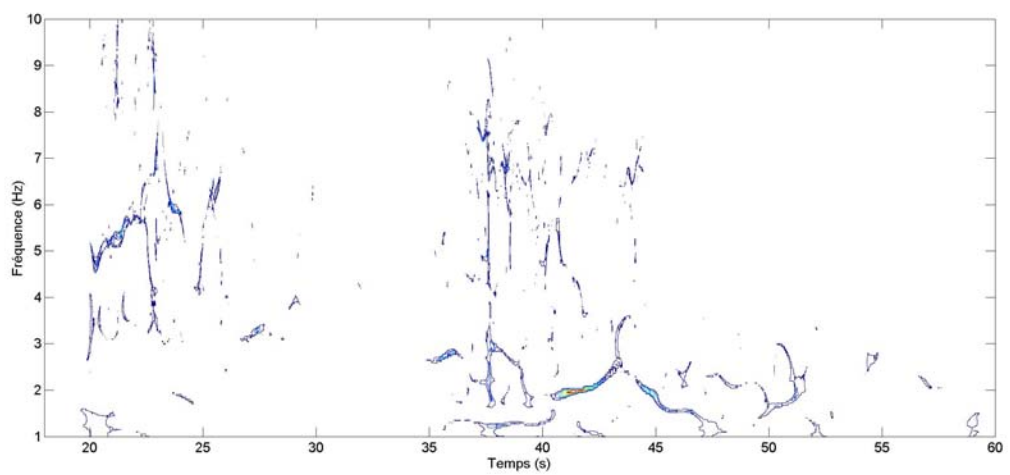
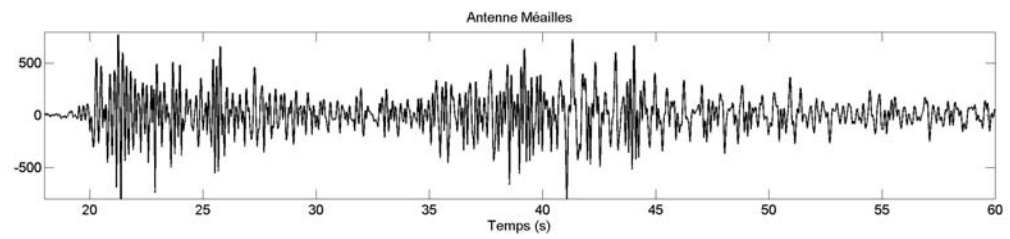


**Fig. 4-7 : Spectres d'énergie des signaux enregistrés par les antennes (a)-Méailles, (b)-Allons, (c)-Saint-Benoît et (d)-Ubraye, entre 20 et 55sec. (courbes rouges). Les courbes noires correspondent à trois fois l'énergie des spectres du bruit de fond ambiant enregistré par chacune des antennes une vingtaine de secondes avant le passage des premières ondes sismiques.**

Les décompositions temps-fréquence globales, calculées antenne par antenne, sont représentées Fig. 4-8. Au-dessus de chacune des décompositions, on a également représenté le signal enregistré par un



des capteurs de l'antenne. Les lignes de crêtes ont été extraites du Scalogramme, calculé dans le domaine fréquentiel.



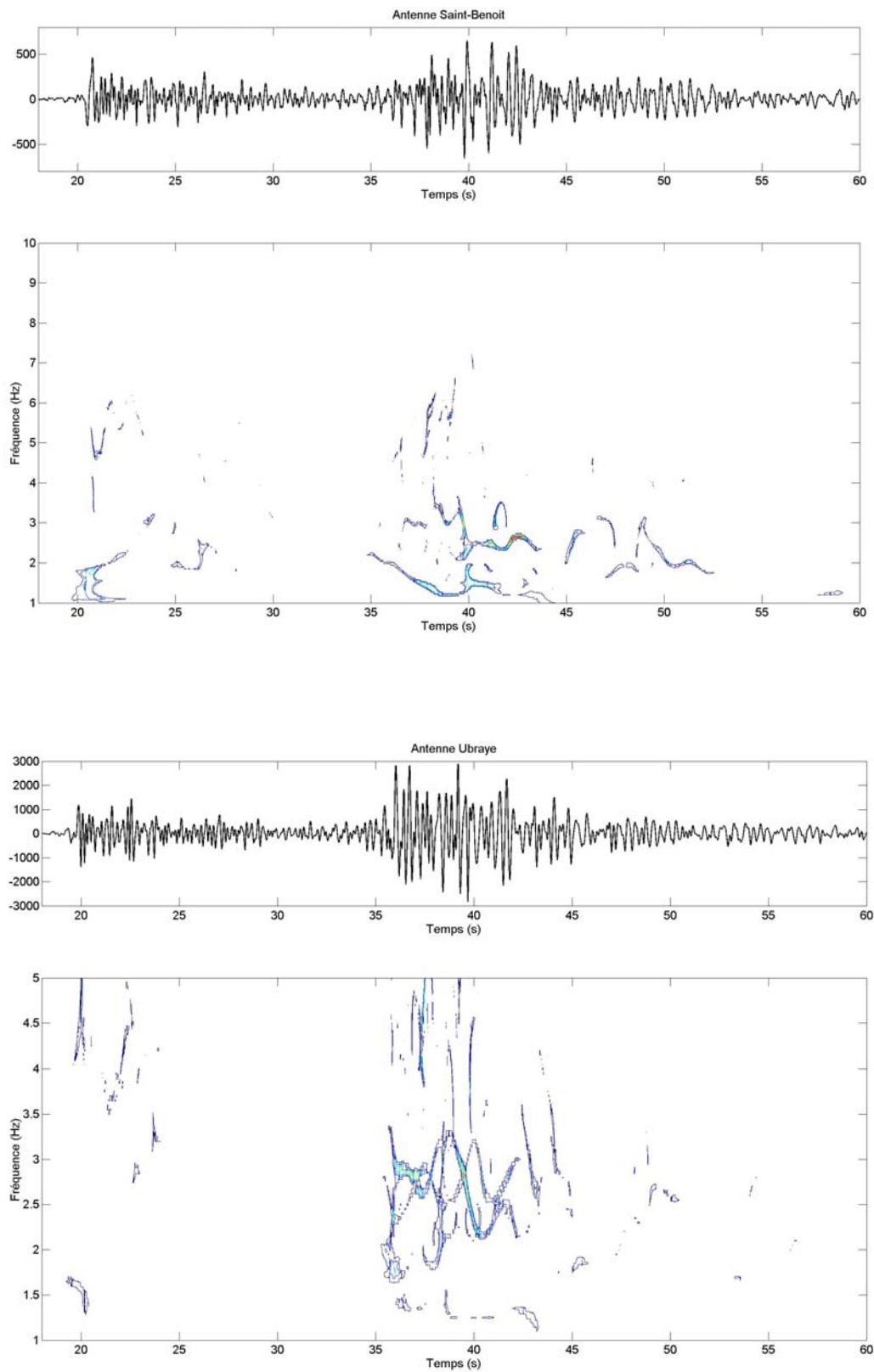


Fig. 4-8 : Décomposition temps-fréquence globale en lignes de crêtes pour l'événement *Gardanne1* enregistré par les antennes *Méailles*, *Allons*, *Saint-Benoît* et *Ubraye*. Au-dessus des différentes décompositions, un des signaux enregistrés par chaque antenne est représenté.

Les différentes décompositions temps-fréquence permettent non seulement d'identifier les zones les plus énergétiques, mais donnent également une mesure de la cohérence de l'ensemble des signaux enregistrés par l'antenne. Une localisation dispersée des lignes de crêtes témoigne en effet d'une perte locale de la cohérence, due soit à de fortes déformations des signaux lorsqu'ils se propagent d'un capteur à un autre, soit à la propagation de phases multiples qui, suivant la manière dont elles interfèrent, donnent lieu à des lignes de crêtes qui n'admettent pas une localisation similaire. De grandes différences dans la localisation des lignes de crêtes sont par exemple observées pour le train d'onde *S* enregistré par l'antenne *Méailles*, lorsque les fréquences sont supérieures à 5Hz. Comme nous le verrons ci-dessous, ces lignes de crêtes seront rejetées par seuillage par rapport au maximum d'énergie de la décomposition temps-fréquence.

La décomposition temps-fréquence globale présente alors l'avantage d'amplifier les zones cohérentes du plan temps-fréquence, pour lesquelles les signaux sont décrits par des lignes de crêtes admettant une localisation commune. Inversement, l'énergie des phases qui donnent lieu à des lignes de crêtes admettant des localisations différentes dans le plan temps-fréquence, sera atténuée.

### ***Décomposition en nombre d'onde***

Les cellules (*temps – fréquence*) correspondant à l'identification d'une ligne de crêtes ont ensuite été décomposées dans l'espace des nombres d'onde. Toutes les lignes de crêtes n'ont pas été retenues pour cette décomposition mais un seuil d'énergie minimale a été fixé au-dessous duquel les lignes de crêtes ne seront pas considérées dans l'analyse. Ce seuil est différent pour chacun des événements analysés et dépend du caractère émergent ou impulsif des phases canoniques du signal. Si ces phases ont un caractère impulsif, il sera nécessaire d'abaisser le seuil de sélection des lignes de crêtes, de manière à analyser les phases secondaires, d'énergies alors beaucoup plus faibles. Si au contraire ces phases canoniques sont émergentes, le seuil fixé ne devra pas être trop bas de manière à ne pas sélectionner des cellules temps-fréquence d'énergie trop faible, ce qui augmenterait considérablement les durées de traitement. Ainsi, pour l'événement *Gardannel*, seules les lignes de crêtes dont l'énergie est supérieure à 10% du maximum de la décomposition temps-fréquence ont été représentées et retenues pour la suite du traitement.

Le long de chaque ligne de crête sélectionnée, une analyse en nombre d'onde a été menée. Une fenêtre temporelle glissante est introduite pour cette analyse, et les signaux initiaux sont filtrés autour de chaque fréquence d'étude. La largeur de la fenêtre d'analyse ainsi que la largeur du filtre utilisé dépendent tous deux de la fréquence de la ligne de crête. Comme il a été discuté au chapitre II, une fenêtre temporelle relativement large a été choisie puisque nous avons fixé cette largeur à trois périodes de signal, favorisant ainsi la stabilité des estimations des paramètres de propagation (voir paragraphe 2.2 du chapitre III).

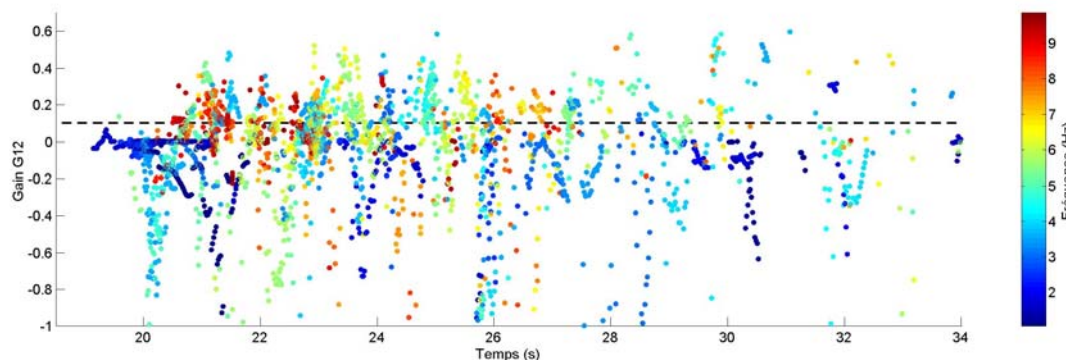
La méthode de décomposition dans l'espace des nombres d'onde est celle développée dans le chapitre II et appliquée dans le chapitre III à l'analyse des signaux synthétiques. Nous rappelons que cette méthode est basée sur la décomposition de l'espace formé par les données, en un sous-espace '*signal*' et un sous-espace '*bruit*' qui lui est orthogonal.

Dans les trois paragraphes suivants, nous allons expliciter dans une configuration d'analyse réelle, comment nous avons choisi les différents paramètres méthodologiques de la décomposition en nombre d'onde :

- Comme nous l'avons montré dans le cas synthétique paragraphe 2.1 du chapitre III, le nombre de vecteurs propres utilisés lors de la décomposition, pour décrire le sous-espace '*signal*' doit être déterminé. De cette première étape résultera l'estimation des paramètres de propagation caractérisant les signaux analysés.
  - De l'ensemble des détections obtenues, ne seront retenues que celles qui présentent une cohérence suffisamment forte. Nous expliciterons alors le critère de cohérence utilisé dans ce travail.
  - Nous serons, enfin, attentifs à la quantité d'énergie reconstruite par le jeu des paramètres de propagation finalement retrouvés et ne garderons que les paramètres pour lesquels le taux d'énergie reconstruite est suffisamment élevé.
- Choix du nombre de vecteurs propres

Le nombre de vecteurs propres utilisés pour caractériser le sous-espace '*signal*' est déterminé à partir du critère du maximum d'énergie expliquée. Nous avons déjà décrit l'utilisation de ce critère lors de l'analyse des signaux synthétiques présentée dans le chapitre III. Nous avons par exemple utilisé deux vecteurs propres dès lors que la quantité d'énergie expliquée avec ces deux vecteurs propres, c'est-à-dire le gain, était supérieure à 1% de l'énergie expliquée avec un seul vecteur propre. Le même procédé avait été utilisé pour décider de l'utilisation d'un troisième vecteur propre.

Pour l'étude des signaux réels, qui présentent généralement une cohérence moins forte que les signaux synthétiques ainsi qu'un rapport signal sur bruit plus faible, une valeur supérieure du gain sera utilisée. La Fig. 4-9 présente l'évolution temporelle et fréquentielle du gain  $G_{I2}$  définie par l'Eq II. 25, pour l'événement *Gardanne1* et pour les 15 premières secondes de signal enregistré par l'antenne *Méailles*.



**Fig. 4-9 : Evolution temporelle et fréquentielle du gain  $G12$  lorsqu'on passe du cas où un seul vecteur propre est utilisé pour décrire le sous-espace 'signal' au cas où deux vecteurs propres sont utilisés. La couleur associée à chaque détection donne une estimation de la fréquence. Le trait en pointillé noir représente une valeur constante du gain égal à 0.1.**

Pour fixer la valeur du gain au-dessus de laquelle on estime que la prise en compte de deux vecteurs propres au lieu d'un seul conduit à une meilleure description des signaux, on s'est basé empiriquement sur les valeurs maximales que prend ce gain dans les toutes premières périodes du signal, où on suppose qu'une phase unique se propage à travers l'antenne. Comme le montre la Fig. 4-9, de petites fluctuations du gain peuvent apparaître dans les premières secondes de signal. Ici, la valeur du seuil est fixée à 0.1, ce qui signifie que lorsque le gain est supérieur à 0.1, l'utilisation d'un deuxième vecteur propre permet d'expliquer une quantité d'énergie qui est supérieure à 10% de l'énergie que l'on expliquerait avec un seul vecteur propre.

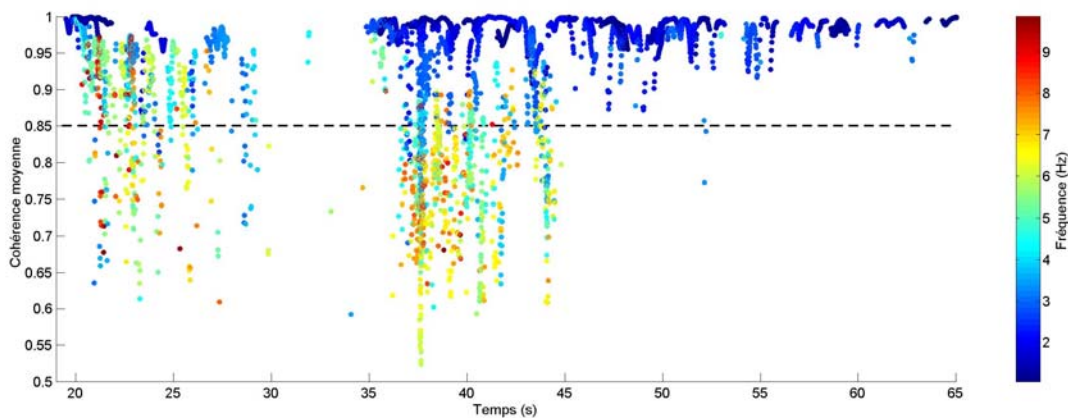
On observe Fig. 4-9 que le gain est généralement plus élevé à haute fréquence qu'à basse fréquence, ce qui signifie que lorsque des composantes multiples se propagent à travers l'antenne, le pouvoir de séparation par décomposition en nombre d'onde augmente avec la fréquence. Ce résultat reproduit donc un résultat intuitif qui met en évidence le compromis entre longueur d'onde du champ d'onde analysé et pouvoir de séparation d'une antenne. Cette dernière observation avait déjà été faite dans le chapitre III lorsque des contenus fréquentiels différents avaient été utilisés pour simuler la propagation d'une explosion en milieu hétérogène. On avait alors remarqué que la séparation de composantes multiples devenait plus difficile à basse fréquence.

Pour l'analyse des sismogrammes réels, nous n'avons pas utilisé plus de deux vecteurs propres pour décrire le sous-espace 'signal', car nous avons constaté que la détermination des paramètres de propagation devient très instable dès lors que l'on cherche à déterminer la présence simultanée d'un nombre élevé de phases, dans une même fenêtre temporelle et à la même fréquence. Lors de l'analyse des signaux synthétiques (chapitre III), nous avons déjà montré la dispersion accrue des paramètres de propagation au fur et à mesure de l'augmentation du nombre de vecteurs propres. Nous avons alors établi le compromis entre détection maximale du nombre de phases et détermination optimale des

paramètres de propagation ; la recherche d'un nombre de phases élevé risquant de détruire davantage l'information contenue dans les signaux que d'en améliorer la description.

- Seuil de cohérence

Nous avons également défini la notion de cohérence locale au chapitre II. En effet, la bonne cohérence des formes d'onde analysées à l'échelle de l'antenne est une condition nécessaire pour que la décomposition en nombre d'onde soit valide. Pour chaque cellule temps-fréquence sélectionnée, nous vérifierons donc que la cohérence est suffisamment élevée. Ce calcul de cohérence est directement intégré dans la décomposition en nombre d'onde et est calculé par l'Eq. II.8. Cornou (2002) utilise le calcul de la cohérence locale des formes d'onde pour identifier les cellules temps-fréquence qui seront ensuite décomposées dans l'espace des nombres d'onde. Dans ce travail, nous avons expliqué précédemment que nous identifions ces cellules en nous basant sur un critère d'énergie. Cependant, une vérification systématique sera faite de la bonne cohérence locale des formes d'onde que décrivent ces cellules. L'évolution temporelle et fréquentielle de la cohérence locale pour l'événement *Gardanne1* enregistré par l'antenne *Méailles* est représentée Fig. 4-10.



**Fig. 4-10 : Evolution temporelle et fréquentielle de la cohérence locale pour les signaux enregistrés par l'antenne *Méailles*, pour l'événement *Gardanne1*. La couleur associée à chaque point est une estimation de la fréquence, entre 1 et 10Hz.**

Pour les fréquences inférieures à 3 Hz, la cohérence est comprise entre 0.95 et 1. Pour les fréquences supérieures à 3Hz, la cohérence peut diminuer fortement. Un seuil de cohérence minimum a alors été fixé au-dessus duquel on considérera que les signaux sont suffisamment cohérents pour que l'analyse en nombre d'onde puisse être valide. Les faibles distances qui séparent les différents capteurs permettent de présumer une cohérence forte de toute composante ondulatoire qui se propage à travers l'antenne. Nous pouvons donc être exigeant face au seuil minimum de cohérence fixé. Pour l'événement *Gardanne1*, nous avons fixé ce seuil à 0.85. Les détections présentant une cohérence

inférieure à ce seuil ne seront pas prises en compte dans les résultats de la décomposition temps-fréquence-nombre d'onde.

- Quantité d'énergie expliquée

Enfin, nous avons déjà montré la nécessité d'utiliser un critère de vérification *a posteriori* des paramètres de propagation retrouvés par la décomposition en nombre d'onde. Ces paramètres sont obtenus à partir du (ou des) maximum(s) de la décomposition en nombres d'onde. Nous avons déjà expliqué, dans le chapitre II, que l'algorithme *MUSIC* utilisé tel quel, ne permet pas de vérifier *a posteriori*, la validité des paramètres retrouvés par l'analyse. Une décomposition en nombre d'onde réalisée à partir d'un ensemble de signaux quelconques, suivie d'une recherche du maximum est toujours possible. Mais il faut alors s'assurer que le maximum retenu correspond bien à une propagation réelle des signaux à travers l'antenne. Le calcul de la quantité d'énergie qu'explique le jeu de paramètres de propagation déterminé par l'analyse en nombre d'onde permet de ne retenir que ceux qui expliquent réellement une quantité importante de l'énergie contenue dans les signaux analysés. Ce critère est calculé pour chacune des cellules temps-fréquence analysées.

Lors de la définition et de l'analyse de ce critère, nous avons remarqué que l'analyse d'un bruit blanc gaussien conduisait cependant à une reconstruction d'énergie expliquée oscillant autour de 70% de l'énergie globalement contenue dans les signaux analysés (chapitre II, section 3.3.5). Cette valeur élevée du taux de reconstruction est en partie due à la faible ouverture de l'antenne. Nous devons là encore être exigeant face à la quantité d'énergie expliquée et ne retiendrons alors que les détections qui permettent d'expliquer une quantité d'énergie en moyenne supérieure à 85% de l'énergie contenue dans les signaux analysés.

L'ensemble des paramètres explicités dans les trois derniers paragraphes, tout comme la détermination de la gamme de fréquence intéressante à analyser sont variables en fonction des signaux enregistrés par chacune des antennes. La détermination des paramètres optimaux a donc été systématiquement et manuellement renouvelée pour chaque événement analysé, et pour chacune des antennes.

Les différents graphes représentés **Fig. 4-11** donnent les résultats des décompositions temps-fréquence-nombre d'onde obtenus pour l'événement *GardanneI*. L'évolution temporelle des directions de propagation de chaque phase sismique suffisamment énergétique et cohérente est représenté pour chacune des antennes. La couleur associée à chaque détection indique la vitesse apparente de propagation de chacune de ces phases à travers l'antenne.

On a également représenté, à gauche de chacun des graphes, l'énergie globale qui se propage dans chacune des directions de l'espace (entre N0 et N360°) pour la période de temps analysée. Les détections dont la vitesse apparente de propagation est supérieure à 9000 m/s sont rejetées.

Les remarques typiques suivantes peuvent être faites quant aux résultats obtenus sur ce premier événement :

- La direction de propagation des toutes premières formes d'onde n'est pas systématiquement celle de l'azimut théorique de la propagation.

Sur l'antenne *Méailles*, trois groupes simultanés de détections caractérisent les toutes premières arrivées. Ces trois groupes sont reliés aux trois lignes de crêtes qui décrivent les premières arrivées du signal et qui sont représentées sur la décomposition temps-fréquence Fig. 4-8. Un des paquets de détections est localisé selon l'azimut de la source, avec des vitesses de propagation égales à 6500 m/s. Le deuxième paquet de détections est caractérisé par un azimut N200° et des vitesses plus élevées, de l'ordre de 8500 m/s, indiquant une propagation de profondeur, proche du Moho. Ce deuxième paquet correspond à l'analyse de la ligne de crête pour laquelle la fréquence est égale à 1.5Hz. Les écarts observés entre l'azimut N200° et celui de la source peuvent avoir plusieurs origines, parmi lesquelles on peut envisager la présence d'une anomalie dans le milieu de propagation (pendage du Moho) ou un manque de résolution des antennes déployées à *Annot*, peu adaptées pour analyser des trains d'ondes basse-fréquence se propageant avec des vitesses élevées (voir chapitre I).

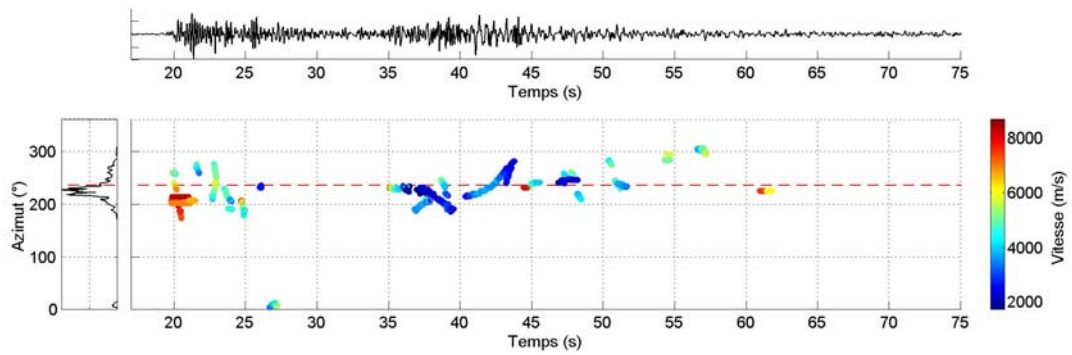
Les premières arrivées enregistrées par l'antenne *Saint-Benoît* se propagent selon l'azimut théorique de la propagation. Là encore, différentes lignes de crêtes caractérisent ces arrivées du signal mais les directions de propagation sont similaires, quelle que soit la fréquence analysée. Par contre, les vitesses apparentes de propagation sont différentes : à basse fréquence, une vitesse égale à 8500 m/s est retrouvée, comme pour l'antenne *Méailles*, alors que pour des fréquences plus élevées, la vitesse apparente est égale à 5000 m/s .

L'analyse des signaux sur l'antenne *Allons* montre, quant à elle, une direction de propagation proche de N200° pour les toutes premières arrivées, avec une vitesse apparente de propagation de l'ordre de 6500 m/s . Ce premier groupe de détection est suivi par une arrivée qui se propage à des vitesses plus élevées (7500 m/s) et une direction plus proche de celle de la source.

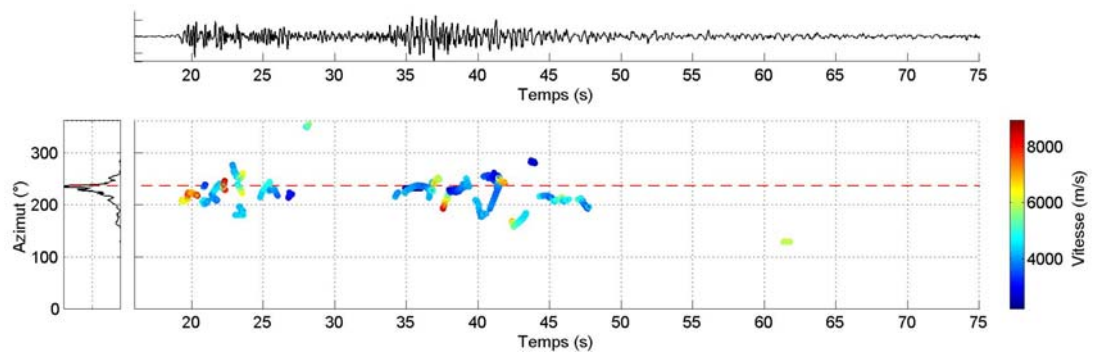
Enfin, l'antenne *Ubraye* a enregistré une onde se propageant selon une direction plus septentrionale que l'azimut de la source, et des vitesses plus faibles que celles trouvées pour les autres antennes, de l'ordre de 5000 m/s .



GARDANNE1 / AZIMUT THEORIQUE N236° / DISTANCE EPICENTRALE 115KM / MAGNITUDE 3.0  
ANTENNE MEAILLES



GARDANNE1 / AZIMUT THEORIQUE N236° / DISTANCE EPICENTRALE 109KM / MAGNITUDE 3.0  
ANTENNE ALLONS



GARDANNE1 / AZIMUT THEORIQUE N240° / DISTANCE EPICENTRALE 119KM / MAGNITUDE 3.0  
ANTENNE SAINT-BENOIT

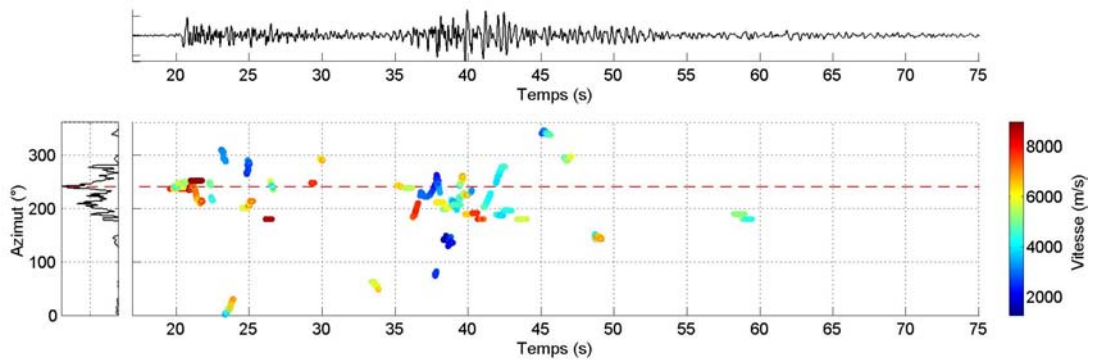
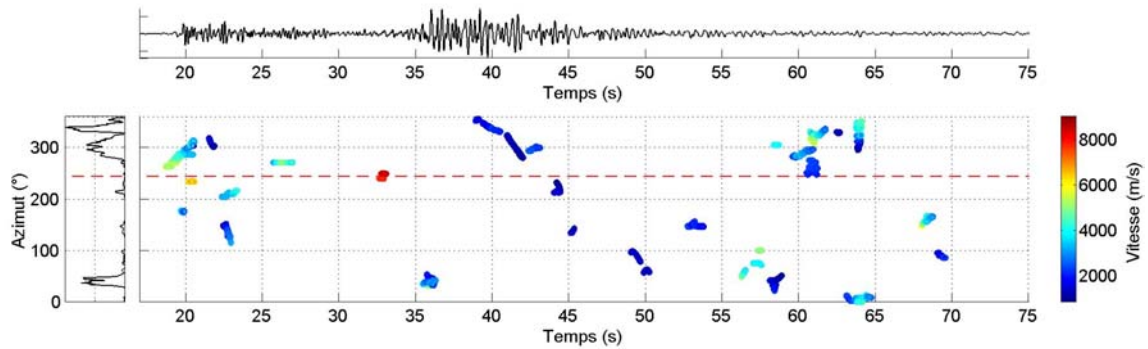


Fig. 4-11 : suite page suivante



**Fig. 4-11 : Evolution temporelle des direction de propagation des phases sismiques enregistrées pour l'événement *Gardanne1* sur les antennes *Méailles*, *Allons*, *Saint-Benoît* et *Ubraye*. A chaque détection est associée une couleur qui indique la vitesse apparente de propagation de l'onde à travers l'antenne. Le trait pointillé rouge indique l'azimut théorique de la localisation épiscopentrale de cet événement. A gauche de chaque graphe, figurent les distributions énergétiques des directions de propagation.**

- Après l'arrivée de ces premières ondes, on observe sur les antennes *Méailles* et *Allons*, la détection de phases multiples se propageant à travers l'antenne avec des directions de propagation variant autour de la direction de la source de l'événement et des vitesses de l'ordre de  $5000\text{ m/s}$  pour *Méailles* et  $4000\text{ m/s}$  pour *Allons*. Ces détections sont moins nombreuses sur l'antenne *Saint-Benoît*.
- Sur le train d'onde *S*, entre 35sec. et 50sec., une série de détections caractérise le train d'onde *S* enregistré par les antennes *Méailles* et *Allons*. Les vitesses sont devenues plus faibles (entre  $3000$  et  $4000\text{ m/s}$ ) et les directions de propagation restent toujours proches de la direction théorique. On observe cependant pour ces phases, de larges variations continues d'azimuts, comme par exemple pour l'antenne *Méailles* où entre 40 et 45sec., les directions d'arrivées présentent une variation d'azimut depuis N200° jusqu'à N300°. Sur l'antenne *Saint-Benoît*, le train d'onde *S* présente une moins grande stabilité : les ondes identifiées apparaissent par paquets. De plus, des phases rapides, dont la vitesse avoisine  $6000\text{ m/s}$  apparaissent dans ce train d'onde. Ces phases doivent avoir des origines très locales.
- Les distributions énergétiques des directions de propagation, représentées à gauche des évolutions temporelles des paramètres de propagation, sont construites en cumulant l'énergie des phases qui se propagent selon chacune des directions comprises entre N0° et N359°. Si le milieu de propagation ne présentait pas de zones hétérogènes, la distribution énergétique présenterait de l'énergie pour une seule direction de propagation : celle de la source sismique. La présence des zones hétérogènes dans le milieu de propagation modifie la trajectoire du champ d'onde incident, faisant ainsi apparaître des directions de propagation secondaires de l'énergie. Dans certains cas, ces directions secondaires peuvent devenir prédominantes dans le

bilan énergétique et effacer la signature de la source sismique. Nous appellerons contributions hors azimut, celles qui n'ont pas eu un trajet de propagation direct depuis l'épicentre jusqu'à l'antenne et qui se propagent donc à travers l'antenne avec une direction de propagation qui n'est plus celle théorique de la source sismique. Ces contributions ont subi une ou plusieurs déviations au cours de leurs propagation.

Le calcul des distributions d'énergie, pour chaque séisme, permet de retrouver les directions de propagation privilégiées de l'énergie. Une mise en commun de ces directions, obtenues antenne par antenne, permettra alors de savoir si ce sont les mêmes hétérogénéités qui ont donné naissance aux phases sismiques secondaires enregistrées par les différentes antennes et si oui, de retrouver la localisation de ces hétérogénéités.

La distribution énergétique des directions de propagation obtenue pour l'antenne *Méailles* présente trois directions prépondérantes de propagation de l'énergie. Aucune de ces directions ne coïncide exactement avec la direction de la source. Deux pics d'énergie importante sont localisés autour des azimuts N220° et N230°. Une certaine quantité d'énergie, d'amplitude cependant beaucoup plus faible, est également présente autour de la direction N270°. La distribution énergétique obtenue pour l'antenne *Allons* montre quant à elle que le maximum d'énergie se propage selon la direction de la source. Cependant, de l'énergie est également présente pour des directions plus méridionales à la direction de la source, jusqu'à N210°. Pour les antennes *Méailles* et *Allons*, les contributions hors azimut restent peu nombreuses ou du moins peu énergétiques. Le spectre de diffraction caractérisant l'antenne *Saint-Benoît*, présente également une forte contribution énergétique dans la direction de la source. Elle s'accompagne de trois autres directions de propagation privilégiées dans les azimuts N190°, N210° et N275°, directions qui n'étaient pas fortement énergétiques sur les spectres de diffraction associés aux antennes *Méailles* et *Allons*. Une contribution d'énergie très faible caractérise également la distribution d'énergie de l'antenne *Saint-Benoît*, dans la direction N330°. L'antenne *Ubraye* est celle pour laquelle les contributions énergétiques hors azimut sont les plus importantes. Les champs d'onde se propagent à travers cette antenne avec trois directions privilégiées qui sont N40°, N300° et N340°. Aucune quantité d'énergie significative n'est observée dans la direction de la source de l'événement. Ces observations seront fréquentes à *Ubraye* pour tous les événements étudiés.

On observe donc, à partir des évolutions temporelles des paramètres de propagation, que malgré la variabilité des phases enregistrées par les antennes *Méailles*, *Allons* et *Saint-Benoît*, des traits communs sont retrouvés (train d'onde *S* se propageant autour de la direction théorique de propagation, distribution énergétique présentant de fortes contributions dans une direction de propagation proche de la source).

Par contre, l'antenne *Ubraye* ne présente pas un comportement similaire aux trois autres antennes. Nous avons déjà remarqué lors de la comparaison des signaux enregistrés par chaque antenne, les fortes amplitudes de ceux enregistrés par l'antenne *Ubraye*. Cette première observation montre qu'un effet local à ce site d'observation amplifie fortement et focalise, suivant des directions privilégiées, les trains d'ondes qui s'y propagent. Nous rappelons que l'antenne *Ubraye* est localisée sur un plateau sommital alors que les trois autres antennes reposent dans le fond ou sur les flancs de vallées. Des phénomènes de focalisation de l'énergie doivent donc exister dans une structure comme celle sur laquelle repose l'antenne *Ubraye*, qui conduisent à une amplification des signaux. La décomposition temps-fréquence-nombre d'onde a confirmé l'originalité des signaux enregistrés à *Ubraye*. Le train d'onde *S* qui, pour les autres antennes, se propagent bien selon des directions avoisinantes de celle de la source, présente des paramètres de propagation sans relation avec ceux attendus. De plus, les vitesses de propagation des différentes phases sont réellement plus faibles que celles des phases qui se propagent à travers les trois autres antennes.

### *Conclusions pour Gardanne1*

Les signaux enregistrés sur *Méailles* et *Allons* semblent donc essentiellement subir une influence régionale. Les directions secondaires de propagation de l'énergie sont peu nombreuses et la plus grande partie de l'énergie contenue dans les signaux se propage selon des directions proches de la source. Le champ d'onde est affecté par des hétérogénéités principalement localisées sur le chemin de propagation du champ d'onde incident, qui relie l'épicentre du séisme à chacune des antennes. C'est donc une influence régionale qui est mise en évidence. Les signaux enregistrés par l'antenne *Saint-Benoît* subissent eux aussi ces influences régionales, mais de l'énergie se propage également selon d'autres directions secondaires. Ces derniers effets sont propres à cette antenne puisqu'ils n'avaient pas été détectés par les antennes *Méailles* et *Allons*. Enfin, les signaux enregistrés par l'antenne *Ubraye* ne portent, quant à eux, que des informations locales au site d'enregistrement. En effet, la forte quantité d'énergie se propageant selon la direction de la source pour les trois autres antennes n'apparaît plus dans le bilan énergétique associé à l'antenne *Ubraye*. Pourtant, pour cette antenne, les influences régionales doivent exister comme pour les autres antennes. En particulier, le train d'onde *S*, devrait présenter des évolutions temporelles de paramètres de propagation similaires à celles observées sur les trois autres antennes. Il doit donc y avoir pour cette antenne, une influence très locale du site d'enregistrement, qui oblitère complètement la signature régionale du champ d'onde incident.

#### 4.2.2. Reconstruction des zones hétérogènes du milieu de propagation

Nous allons à présent montrer, comment nous avons utilisé les évolutions temps-azimuts-vitesses des phases secondaires du signal, pour localiser les zones hétérogènes du milieu de propagation. D'abord, la technique de reconstruction sera présentée. Elle sera ensuite appliquée à l'ensemble des signaux analysés et enregistrés par chaque antenne. D'une part, le résultat global, obtenu à partir des observations faites par les quatre antennes sera présenté. D'autre part, le résultat obtenu des inversions antenne par antenne sera également présenté de manière à comparer l'image du milieu de propagation que nous renvoie chacune des antennes. Enfin, une analyse plus détaillée sera menée et présentera les comportements différents que présentent chaque groupe d'événements analysés, à partir de chaque antenne.

##### *Technique de reconstruction*

Dans le chapitre III concernant l'analyse des signaux synthétiques, nous avons introduit la méthode du single-scattering (simple diffraction) qui permet de localiser les zones hétérogènes du milieu de propagation à partir des détections obtenues par l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde. Nous allons appliquer cette technique de reconstruction aux évolutions temps-azimuts-vitesses des détections obtenues lors de l'analyse des séismes enregistrés durant la campagne d'*Annot*.

Mais tout d'abord, rappelons le principe de cette méthode de reconstruction qui repose sur le processus de diffraction simple (Aki, 1969) ainsi que les principales hypothèses que nécessitent l'utilisation de cette méthode.

Supposons qu'il se produise un séisme au temps  $t_0$ . Au fur et à mesure que le temps s'écoule, le champ d'onde incident libéré par la source sismique au temps  $t_0$ , peut explorer des zones géographiques se situant à des distances de plus en plus éloignées de la source et du récepteur. On peut montrer qu'au temps  $t = t_0 + \Delta t$ , le lieu géographique des points que peut atteindre le champ d'onde forme un ellipsoïde dont les foyers sont la source d'une part et le récepteur d'autre part (voir chapitre III, Fig. 11). Avec les antennes, on connaît la projection horizontale de propagation du champ d'onde. La position des possibles points de diffraction se trouve donc sur une courbe décrivant l'intersection entre l'ellipsoïde et le demi-plan vertical de direction similaire à celle du vecteur de propagation de l'onde, déterminé par l'analyse en antenne. A partir d'une seule antenne, la position du point diffractant le long de cette courbe est indéterminée. Pour deux séismes dont les hypocentres sont voisins, la position du point diffractant peut être retrouvé en profondeur : il se trouve à l'intersection des deux ellipsoïdes (dont les foyers sont le récepteur d'une part et les hypocentres des séismes d'autre part), et du demi-plan dont la direction est déterminée par l'analyse en nombre d'onde. De même, si

pour un séisme donné, un même point diffractant est vu par deux antennes, le même principe permet de retrouver la position du point de diffraction. Il se trouve alors à l'intersection des deux ellipsoïdes (dont les foyers sont l'hypocentre du séisme d'une part et positions des deux antennes d'autre part), et du demi-plan dont la direction est déterminée par l'analyse en nombre d'onde.

Cette technique simple de localisation permet donc de retrouver, pour chaque échantillon temporel du signal, la localisation du point de diffraction responsable de la propagation des phases secondaires à travers l'antenne d'observation. Nous avons montré dans le chapitre III, que cette technique permettait, au premier ordre, une bonne localisation des zones hétérogènes qui avaient été introduites dans le milieu. Nous avons également expliqué l'origine des biais qui pouvaient exister dans la localisation des zones hétérogènes (propagation de phases multiples à travers l'antenne, durée de chacune des phases, coda caractérisée par une durée longue). Fort de cette expérience, nous avons voulu appliquer la même technique de reconstruction en première approximation à partir des analyses de propagation du champ d'onde dans un milieu réel.

Il faut cependant garder à l'esprit ce que sous-entend l'utilisation de cette technique d'inversion :

- (1) une seule diffraction est considérée entre la source et l'antenne
- (2) le trajet se fait entièrement dans un plan horizontal.
- (3) les vitesses de propagation des ondes dans le milieu sont supposées connues
- (4) le reste du milieu est homogène. Les vitesses de propagation sont donc supposées constantes entre l'hypocentre et le diffracteur d'une part, et entre le diffracteur et l'antenne d'autre part.

Lors de l'analyse des signaux synthétiques, la propagation se faisait effectivement dans un plan et (2) n'était donc pas une hypothèse forte. De plus, les vitesses de propagation étaient connues, puisqu'elles étaient directement égales aux vitesses de passage de l'onde à travers l'antenne et permettait de vérifier l'hypothèse (3). Donc, seule l'hypothèse (1) était contraignante.

Pour reconstruire les zones hétérogènes du milieu de propagation à partir de signaux qui ont eu une propagation réelle et complexe dans le milieu, les choses se compliquent considérablement.

- (1) *diffraction simple*. Grâce à l'analyse en antenne, nous sommes capables de retrouver la direction du front d'onde lorsqu'il se propage à travers l'antenne. Cette direction est aussi celle selon laquelle se propage le champ d'onde après avoir été diffracté ou réfracté par la dernière hétérogénéité qu'il a rencontrée avant de traverser l'antenne. Dans la méthode de reconstruction que nous utilisons, nous faisons l'hypothèse que cette dernière diffraction est la seule qui ait influencé le champ d'onde au cours de sa propagation et négligeons donc les diffractions multiples du champ d'onde. Autrement dit, l'hypothèse de diffraction simple sous-entend qu'une diffraction principale a affecté le champ d'onde au cours de sa propagation, et la direction de propagation que nous

mesurons par l'analyse en antenne est celle du champ d'onde après avoir subi cette diffraction principale.

- (2) *modélisation de l'ensemble de la propagation dans un plan horizontal*. L'hypothèse d'une propagation dans un plan horizontal est faite sur l'ensemble du trajet réalisé par les différentes ondes qui traversent l'antenne. En effet, le procédé décrit précédemment, permettant de retrouver la profondeur des différents points de diffraction, est difficile à mettre en œuvre. D'une part, le milieu de propagation n'est vraisemblablement pas constitué de points diffractants, mais par des objets hétérogènes admettant une certaine extension géographique. Il n'est donc pas clairement établi que le champ d'onde incident émis par deux séismes admettant des localisations très voisines aille se diffracter exactement sur le même point. D'autre part, l'analyse des phases secondaires enregistrées par quatre antennes, pour l'événement *Gardanne1*, a montré une grande variabilité des paramètres de propagation, qui ne permettait pas directement de suivre la propagation d'une phase donnée d'une antenne à l'autre. Il semble donc être difficile de se servir, soit de deux séismes de localisation voisine enregistrés par une même antenne, soit d'un seul séisme enregistré par deux antennes différentes, pour déterminer la profondeur des points de diffraction.

Nous avons donc considéré que la propagation des ondes se faisait uniquement dans un plan horizontal, depuis le point d'émission des ondes, jusqu'à chacune des antennes. Nous avons néanmoins estimé l'erreur maximale que nous commettons en terme de localisation des zones hétérogènes. La distance moyenne qui séparent les épicentres du dispositif global d'enregistrement est environ égale à une soixantaine de kilomètres. D'autre part, les vitesses apparentes de propagation des phases secondaires à travers l'antenne sont suffisamment faibles pour qu'une hypothèse de propagation du champ d'onde dans la partie superficielle puisse être faite. Si on fixe à 10 kilomètres la profondeur maximale à laquelle se propage le champ d'onde, l'erreur que l'on commet sur la localisation des diffracteurs est inférieure à 4 kilomètres.

Nous avons donc préféré adopter une hypothèse de propagation du champ d'onde dans un plan horizontal, plutôt que d'introduire de nouvelles hypothèses qui nous permettraient peut-être de localiser la profondeur des points diffractants, mais qui dégraderaient certainement d'avantage la reconstruction.

- (3) *vitesses de propagation*. Les vitesses de propagation que nous déterminons à partir d'une analyse temps-fréquence-nombre d'onde sont des vitesses apparentes de propagation. L'angle d'incidence  $i$  de l'onde, lorsqu'elle se propage à travers l'antenne, est la quantité qui lie ces vitesses aux vitesses réelles de l'onde dans le milieu de propagation, par la relation  $C = V / \sin(i)$ .  $C$  est la vitesse avec laquelle se propage chacune des phases ou encore la vitesse apparente que nous déterminons par l'analyse

en antenne et  $V$  est la vitesse réelle de propagation de l'onde dans le milieu. Nous ne pouvons donc pas directement utiliser les vitesses apparentes comme vitesse réelle de propagation dans le milieu. Néanmoins, elles permettent de faire des hypothèses quant au type d'onde qui se propage à travers l'antenne ( $P$  ou  $S$ ) et donc de leur associer soit une vitesse d'onde  $P$ , soit une vitesse d'onde  $S$ . Sur la base d'étude de coda similaire à la notre dans d'autres régions du globe (Dainty et Toksöz, 1990 ; Dainty et Schultz, 1995), nous avons décidé de fixer différents types de diffraction ( $PP$ ,  $PS$ ,  $SP$ ,  $SS$ ) en fonction (i) du temps qui s'est écoulé depuis l'origine de la perturbation jusqu'à la propagation de la phase étudiée à travers l'antenne et (ii) de sa vitesse apparente de propagation à travers l'antenne. Nous avons considéré que la coda des ondes  $P$  et  $S$  était entièrement composée de phases de type  $P$  ou  $S$ .

Les phases dont les temps d'arrivées sont inférieures au temps d'arrivée théorique de l'onde  $S$ , sont attribuées à des diffractions du type  $PP$  lorsque la vitesse apparente de propagation est supérieure à 4000 m/s et à des diffractions  $PS$  lorsque cette vitesse est inférieure à 4000 m/s.

Les phases se propageant à travers l'antenne pour des temps d'arrivées supérieurs au temps d'arrivée théorique de l'onde  $S$ , sont attribuées à des diffractions du type  $SP$  lorsque la vitesse apparente de propagation est supérieure à 4000 m/s et à des diffractions  $SS$  lorsque cette vitesse est inférieure à 4000 m/s.

Les vitesses réelles de propagation des ondes  $P$  et  $S$  dans le milieu ont été choisies en se basant sur les résultats des tomographies réalisées à partir des données collectées lors de la campagne *GéoFrance3D* (Paul et al., 2001). Cette étude a montré que dans la partie superficielle de la croûte terrestre (les dix premiers kilomètres) de notre domaine d'étude les vitesses d'onde  $P$  et  $S$  sont égales à 6200 m/s et 3200 m/s respectivement.

Lors de l'inversion, nous n'avons pas cherché à localiser la position d'un seul point diffractant, mais d'un ensemble de points diffractants, obtenu en introduisant de petites variations autour de la vitesse de propagation. A chaque détection, nous avons ainsi associé cinq points de diffraction, en utilisant une vitesse d'onde  $P$  égale à  $6500\text{ m/s} \pm 200\text{ m/s}$ , avec un pas égal à  $100\text{ m/s}$  et une vitesse d'onde  $S$  égale à  $3200\text{ m/s} \pm 200\text{ m/s}$ , avec un pas égal à  $100\text{ m/s}$  également. Ainsi, chaque détection ne conduit pas à retrouver la position d'un seul point diffractant mais une zone de diffraction. Cette démarche se justifie par le fait que les diffracteurs du milieu de propagation ne se matérialisent pas par un point, mais sont des objets caractérisés par une étendue spatiale. Nous ne sommes donc pas à la recherche d'un point de diffraction, mais d'un ensemble de points pouvant former une zone hétérogène dans le milieu de propagation. Le flou ainsi introduit sur les vitesses de propagation permet de tenir compte de l'étendue spatiale des différentes zones hétérogènes.

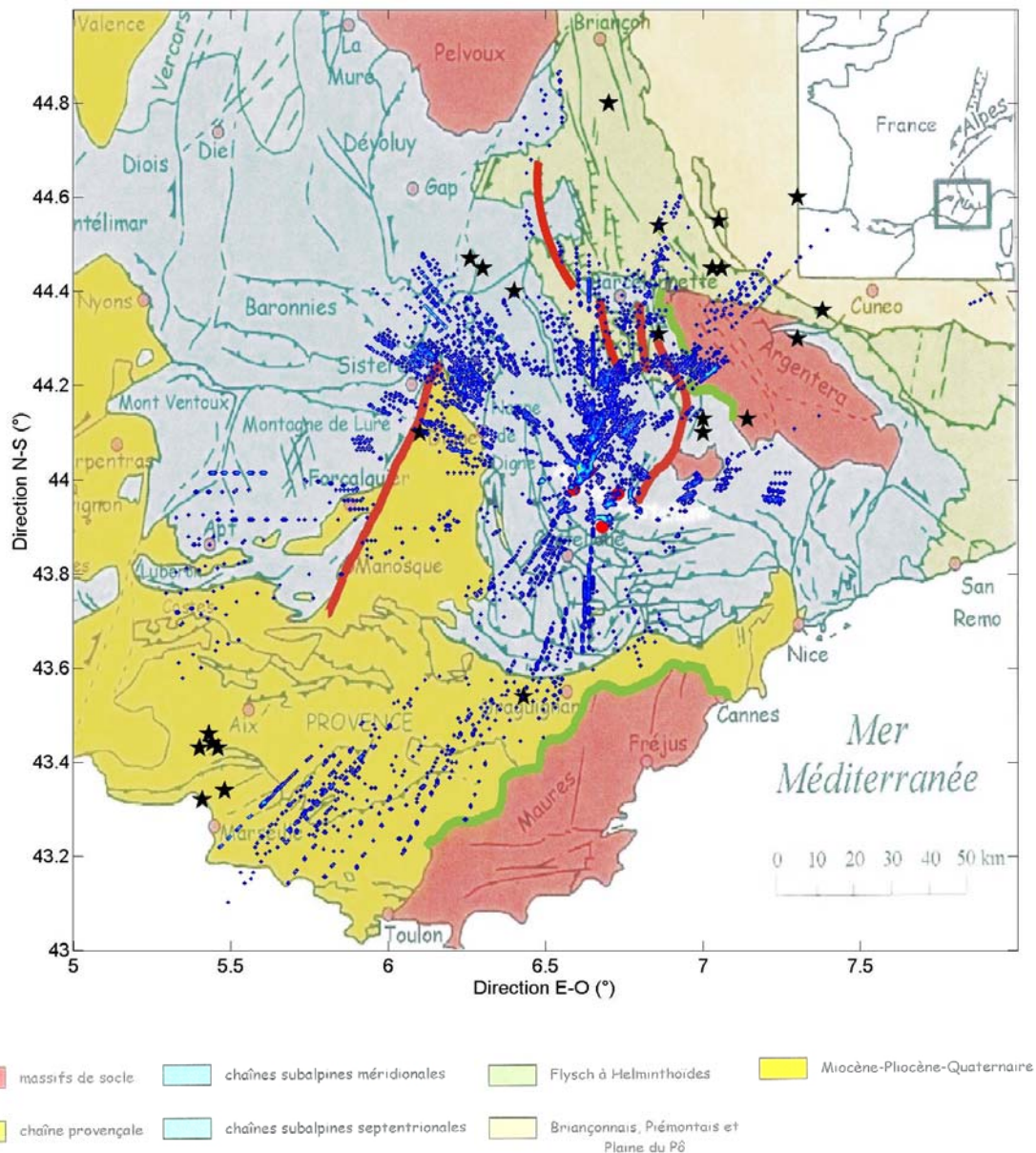


A chaque point de diffraction ainsi retrouvé, on associe l'énergie correspondant à la détection qui a servi à faire l'inversion et donnée par l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde. Cette association est faite en considérant un maillage régulier de toute la zone d'étude, centré sur la position de l'antenne avec laquelle on a enregistré les formes d'ondes. La distance qui sépare deux points du maillage, dans les directions N-S ou E-O est constante et égale à 500 mètres. Si plusieurs détections conduisent à localiser de l'énergie sur le même point de diffraction, l'énergie associée à ce point sera la somme des énergies de l'ensemble de ces détections.

### ***Reconstruction du milieu à partir des observations globales***

Dans un premier temps, nous avons adopté une démarche statistique en utilisant simultanément les évolutions temps-azimuts-vitesses obtenues à partir de l'analyse de l'ensemble des séismes, enregistrés par les quatre antennes. L'image représentée **Fig. 4-12** est le résultat de la localisation des zones hétérogènes du milieu de propagation, telles qu'elles sont vues par les quatre antennes. Pour construire cette image, nous avons utilisé les séismes des groupes *Gardanne*, *Barcelonnette*, *Tinée-Cunéo*, *Digne*, *Briançon*, et *Draguignan*, ce qui représente un ensemble de 23 séismes.

Pour les différents séismes analysés, nous avons calculé l'évolution temporelle des paramètres de propagation, comme il a été explicité pour l'événement *Gardanne1*. Puis, nous avons utilisé la technique de reconstruction développée ci-dessus pour reconstruire les zones hétérogènes du milieu de propagation. Dans cette inversion, chaque séisme a le même poids puisque les énergies des détections obtenues séisme par séisme ont été normalisées par rapport à leur maximum respectif. La contribution de chacune des sources sismiques a été supprimée en ne se servant dans l'inversion que des détections pour lesquelles les directions de propagation diffèrent d'au moins 10° de la direction théorique de propagation associée à la source. Les zones hétérogènes ainsi obtenues ont été superposées à la carte structurale de la région, modifiée par Ritz (1991). Sur cette carte, on a fait figurer la localisation des antennes (points rouges) ainsi que celle des séismes qui ont été utilisés pour la recherche des zones hétérogènes (étoiles noires). Les lignes représentées en rouge marquent les principales failles présentes dans notre domaine d'étude (faille de la Moyenne Durance, Faille du Parpaillon, Faille de Demandols, Faisceau de Faille de Rouaine-StBenoit), celles en verte marquent les principaux contrastes de vitesse du type sédiment/cristallin (Argentera-Mercantour, Maures).



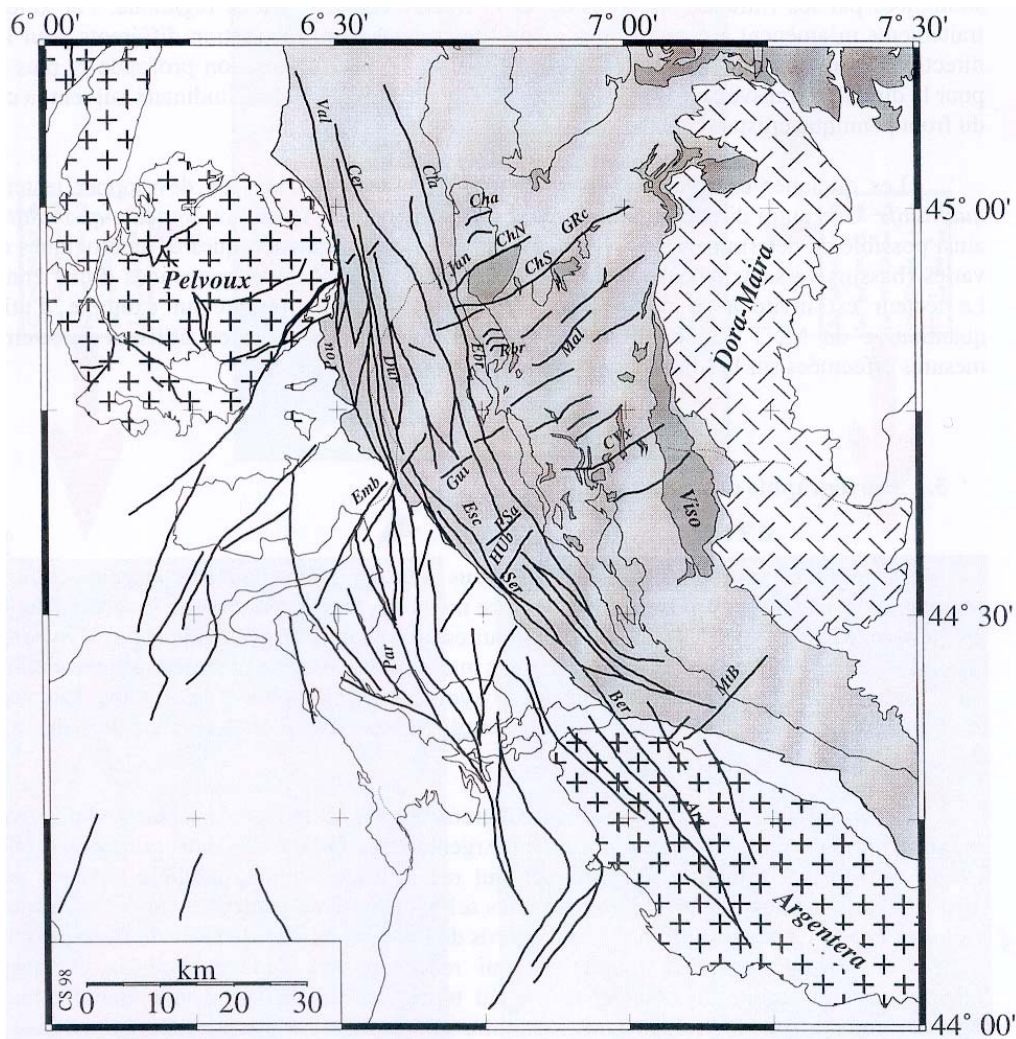
**Fig. 4-12 : Reconstruction des zones hétérogènes du milieu de propagation à partir des évolutions temps-azimut-vitesse obtenues pour les 23 séismes analysés et enregistrés sur les quatre antennes.**

L'image ainsi obtenue permet de mettre en évidence plusieurs zones géographiques où se concentre l'énergie. D'une part, trois zones sont mises en évidence à des distances régionales des antennes d'observation. Des zones préférentielles de diffraction ou de réfraction de l'énergie, responsables des phases secondaires présentes sur les sismogrammes, se dessinent (1) au N-NE du dispositif, (2) au N-NO ainsi que (3) dans une direction sud. Une grande quantité d'énergie est également localisée à proximité des différentes antennes, témoignant de l'importance des diffractions très locales au site d'enregistrement.

### ***Relation entre les zones hétérogènes et les structures géologiques connues***

Nous avons à présent voulu rattacher nos observations avec les connaissances de notre domaine d'étude qu'ont aujourd'hui les géologues. Quelles sont les structures géologiques, tectoniques ou topographiques qui correspondent aux trois zones hétérogènes, identifiées à distance régionales ? Rappelons que nous sommes à la recherche de structures hétérogènes qui présentent un contraste d'impédance ou des variations topographiques, capable de modifier la trajectoire initiale du champ d'onde par des processus de diffraction ou de réfraction. Il peut donc s'agir aussi bien de la présence d'une faille, dont le rejet met en contact des milieux de caractéristiques différentes, ou de deux couches géologiques en contact, présentant elles aussi des caractéristiques différentes ((socle cristallin sous ou à côté de couches sédimentaires), ou encore la présence de reliefs topographiques, dans lesquels le champ d'onde incident se diffracte avant d'être réémis dans la direction de l'antenne.

- La première zone, qui se situe dans des directions géographiques comprises entre N0° et N45° correspond à la localisation de deux réseaux de failles identifiés par les études géologiques faites sur la région. La Fig. 4-13 est un schéma structural du domaine se situant au nord de notre dispositif d'enregistrement (Sue, 1998). Cette carte montre que la faille de la *Haute Durance* (orientation moyenne N160°) se prolonge vers le Sud par vers un faisceau de failles décrochantes en '*queue de cheval*' (Ritz, 1992) et se divise alors en deux branches majeures à hauteur de *Guillestre*. La première branche présente une direction S-E et correspond à la faille de *Serenne* prolongée par la faille de *Bersezio*, plus au sud, qui recoupe le massif de l'Argentera. La deuxième branche suit une direction N-S, dans les nappes de flyschs à Helminthoïdes du *Parpaillon*. Sue (1998) précise qu'il est possible que ces failles soit ancrées dans le socle à quelques kilomètres de profondeur (Ménard, 1979, 1980). Ce système de failles peut donc présenter un rejet vertical suffisant pour générer un contraste de vitesse, de l'ordre de  $2000\text{ m/s}$ , mettant ainsi en contact le socle cristallin ( $V \approx 6000\text{ m/s}$ ) et les séries sédimentaires sus-jacentes ( $V \approx 4000\text{ m/s}$ ). Il permettrait d'expliquer l'ensemble des alignements N-S, localisé dans une direction nord par rapport au dispositif d'enregistrement.



**Fig. 4-13 : Schéma structural synthétique du réseau de failles dans les Alpes sud-occidentales (figure extraite de la thèse de Christian Sue, 1998). Le dispositif global d'enregistrement est localisé au sud de ce réseau de failles.**

Abréviations des failles : Arg : Argentera ; Ber : Bersézio ; Cer : Cerces ; Cha : Chaberton ; ChN et ChS : failles bordières nord et sud du Chenaillet ; Cla : Clarée ; CVx : Col Vieux ; Dur : Durance ; Ebr : est briançonnais ; Emb : embrunais ; Esc : Val d'Escreins ; Fsa : Font Sancte ; GRc : Gran Roc ; Gui : Guil ; Jan : Janus ; Mal : Malrif ; MtB : Mont Borel ; Par : Parpaillon ; Pou : Pusterle ; Ser : Serenne ; Rbr : Roche Brune ; Hub : Haute Ubaye ; Val : Valloire.

Un deuxième paquet d'énergie est localisée dans une direction N-E par rapport au dispositif. Pour ce paquet, deux interprétations différentes sont possibles. D'une part, cette zone correspond elle aussi avec un système de failles connu qui correspond en surface à la faille normale de *Demandols*, située à l'ouest du massif de l'*Argentera*. Cette faille n'est pas référencée sur le schéma structural Fig. 4-13, mais elle l'est sur la carte géologique Fig. 4-1. Cette faille pourrait également affecter le socle et présenter un contraste de vitesse du même ordre de grandeur que celui des failles d'orientation N-S dont il a été discuté précédemment. D'autre part, dans cette direction, est localisé le massif de l'*Argentera*, qui constitue une remontée importante du socle cristallin. Ce massif présente lui aussi, avec les séries marno-

calcaires sus-jacentes un contraste important de vitesse qui permettrait d'expliquer les diffractions observées dans cette direction. Cependant, nous avons localisé le paquet d'énergie à une distance inférieure à celle qui lie le dispositif à l'*Argentera*. Pour éloigner la localisation de ce paquet d'énergie par rapport au centre du dispositif, il faudrait imposer une augmentation des vitesses moyennes de propagation des ondes *P* et *S*. Les phases concernées pourraient alors, pour un temps donné, se propager sur des distances plus grandes. A l'heure actuelle, nous n'avons pas d'arguments déterminants nous permettant de trancher en faveur de l'une ou de l'autre de ces deux structures. Il n'en reste pas moins vrai qu'une quantité d'énergie significative se propage selon cette direction à travers les différentes antennes.

- Une deuxième zone importante d'énergie est identifiée par des ondes se propageant depuis le sud à travers le dispositif d'enregistrement. Dans cette direction, divers ensembles structuraux sont également identifiés. D'une part on trouve le massif métamorphique des *Maures-Tanneron-Esterel*, qui se situe à une cinquantaine de kilomètres au sud du dispositif d'enregistrement. A l'identique de l'*Argentera*, la présence de ce massif induit un contraste important de vitesse avec l'ensemble des séries qui constituent la couverture sédimentaire. D'autre part, à des distances plus proches du dispositif, on trouve la série de chevauchements globalement orientés E-O. Ces chevauchements restent très superficiels puisqu'ils n'affectent que les séries sédimentaires (0-2 kilomètres), mais constituent cependant d'importants reliefs topographiques. Là encore, une discussion est ouverte sur le type d'hétérogénéité ayant pu contribuer à renvoyer de l'énergie selon une direction approximativement N180° à travers le dispositif d'enregistrement. Si on se fie à la localisation des zones hétérogènes obtenues à partir de l'inversion de nos données, les diffractions seraient attribuées à cet ensemble de chevauchements d'axe E-O. Comme précédemment, une augmentation moyenne des vitesses utilisées dans notre modèle devrait nous permettre de localiser les zones hétérogènes au niveau du massif des *Maures*. Cependant, l'ensemble de l'énergie localisée au sud du dispositif a principalement été engendré par le séisme de *Draguignan*. Pour cet événement, les signaux enregistrés par les différentes antennes présentent un train d'onde *S* quasiment monofréquentiel (fréquence dominante  $\sim 3\text{Hz}$ ), de forte amplitude. Ce type de signal est caractéristique d'une propagation proche de la surface (phénomène de résonance dans une couche sédimentaire, par exemple). Nous pensons alors que ce sont des hétérogénéités proches du dispositif d'enregistrement qui ont généré la présence des phases secondaires à travers l'antenne. Nous pensons donc que l'énergie enregistrée depuis la direction globalement N180° doit son origine à l'ensemble des reliefs topographiques dans lesquels les champs d'onde incidents sont diffractés et amplifiés avant d'être renvoyés dans la direction de l'antenne.
- Une troisième et dernière zone importante d'énergie a été localisée dans une direction N-O par rapport au dispositif d'enregistrement. Cette zone énergétique est localisée à l'intersection entre le bassin alluvial de *Valensole*, la faille de la *Moyenne Durance* et le front de la nappe de



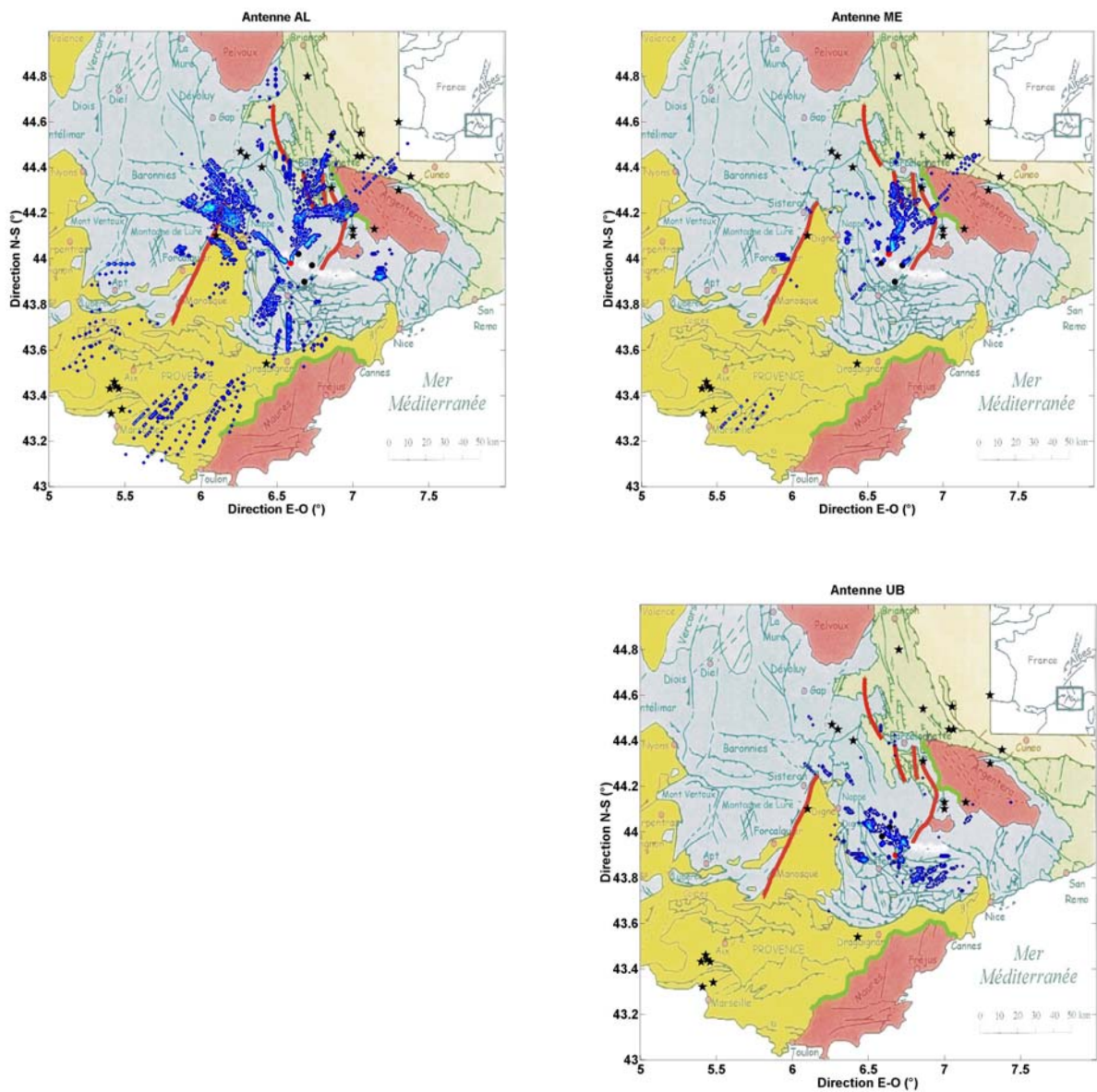
chevauchement de *Digne*. Si en terme de contraste de vitesse, le bassin de *Valensole* ne constitue pas une structure majeure de notre domaine d'étude, la terminaison septentrionale de la faille de la *Moyenne Durance*, pourrait être une candidate potentielle, responsable des phases se propageant à travers les antennes depuis cette direction. Cette faille, d'orientation globale N20°, est constituée de plusieurs segments et s'étend alors sur plusieurs kilomètres de large. Durant son fonctionnement en faille normale à l'oligocène, elle présentait un rejet environ égal à 1000 mètres, séparant ainsi le plateau de *Valensole* de *Forcalquier*. Cette faille s'enracine dans le socle, mettant ainsi en contact des milieux présentant un fort contraste de vitesse (Baroux, 2000).

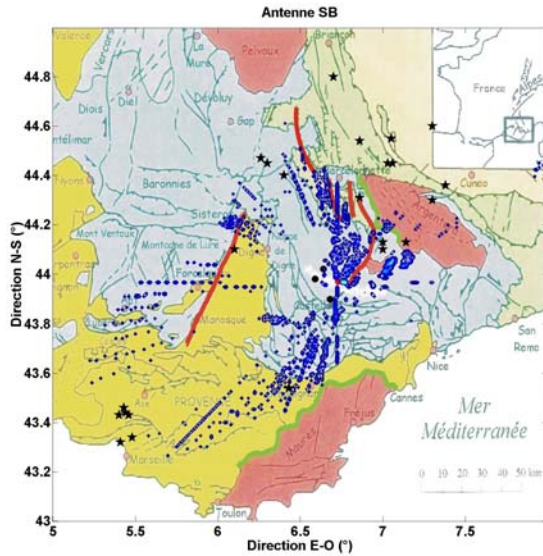
Néanmoins, si cet objet géologique est réellement responsable des phases diffractées se propageant depuis cette direction N-O, la zone d'énergie que nous lui associons s'étale sur une dizaine de kilomètres à l'est et à l'ouest de la faille. Là encore, cet étalement doit trouver son origine dans les hypothèses que nous avons faites lors de la reconstruction des zones hétérogènes. Il serait alors intéressant de traiter le problème inverse. Quel est le jeu de vitesse qu'il convient d'utiliser pour que les points de diffraction s'alignent le long de la faille de la *Moyenne Durance* ? Ce problème intéressant consiste à retrouver les paramètres de propagation (vitesse, angle d'incidence des ondes) qu'il est nécessaire d'attribuer à chaque détection, en se fixant a priori la localisation des présumées zones de diffraction. Ce type d'inversion n'a pas été réalisé dans cette thèse mais nous y reviendrons dans les perspectives associées à ce travail.

En utilisant l'ensemble des séismes enregistrés par les quatre antennes, nous avons reconstruit les zones hétérogènes du milieu de propagation, telles qu'elles sont vues par les quatre antennes. Nous avons réussi à mettre en évidence des zones privilégiées du milieu présentant de fortes concentrations de l'énergie. Un premier groupe est localisé autour du dispositif global d'enregistrement, à des distances très locales, alors que trois autres groupes se situent à des distances plus régionales. A partir des informations géologiques concernant la région d'étude, nous avons proposé des structures géologiques identifiées comme candidats potentiellement responsables de la génération des phases sismiques secondaires enregistrées par les quatre antennes. Nous gardons cependant à l'esprit que la méthode de reconstruction que nous avons utilisée nécessite de faire de fortes hypothèses sur la propagation du champ d'onde incident dans le milieu.

### *Influence de la position de l'antenne*

De manière à quantifier l'influence des structures sur les champs d'onde enregistrés par chaque antenne, nous avons réitéré les inversions précédentes, mais en utilisant séparément les observations faites pour chaque antenne. Par contre, les 23 séismes utilisés précédemment dans la reconstruction globale ont également été utilisés pour construire ces images. Les résultats des reconstruction sont présentés **Fig. 4-14**, antenne par antenne.





**Fig. 4-14 : Localisation des zones hétérogènes du milieu de propagation telles qu'elles sont vues par chacune des antennes *Méailles*, *Allons*, *Saint-Benoît* et *Ubraye*. Les points noirs représentent la localisation de chaque antenne et le point rouge représente la localisation de l'antenne pour laquelle l'inversion a été faite. Les étoiles noires représentent la localisation des différents séismes utilisés pour construire ces images.**

Ces images apportent, par rapport à celle qui avait été présentée Fig. 4-12, de nouvelles informations, concernant la variabilité des hétérogénéités mises en jeu lorsque l'on fait varier la position de l'antenne laquelle subit le champ d'onde enregistré.

La zone hétérogène localisée dans une direction géographique variant entre  $N0^\circ$  et  $N60^\circ$  est systématiquement retrouvée pour les trois antennes *Méailles*, *Allons* et *Saint-Benoît*. Dans les trois cas, le réseau de faille orientées N-S (faille du *Parpaillon*), au nord du dispositif, ainsi que la faille de *Demandols* semblent présenter des interactions importantes avec le champ d'onde incident. D'autre part, des diffractions très locales apparaissent également quelle que soit l'antenne considérée.

#### *Et qu'en est-il d'Ubraye ?*

La reconstruction des zones hétérogènes, à partir des signaux enregistrés par *Ubraye* présente un comportement réellement différent des trois autres antennes. La quantité importante d'énergie qui se propage selon des directions comprises entre  $N0^\circ$  et  $N60^\circ$  n'apparaît que très peu sur cette image. L'hypothèse de la présence de forts effets locaux, qui avait été invoquée pour expliquer l'évolution des paramètres de propagation des phases secondaires diffractées lors de l'événement *Gardanne1*, semble être confirmée lorsque l'on prend simultanément en compte les observations enregistrées pour de nombreux séismes, de localisation très différentes. Une faible quantité d'énergie est cependant localisé au S-E de l'antenne *Ubraye*, le long des chevauchements orientés E-O, zone qui avait déjà été mise en évidence lors de la reconstruction globale des zones hétérogènes du milieu.



Une interprétation directe de l'image qui reconstruit les zones hétérogènes du milieu de propagation nous conduirait à conclure que les zones hétérogènes situées à distance régionale du dispositif de propagation n'influence pas les champs d'onde qui se propagent à travers l'antenne *Ubraye*. Cependant, pour cette antenne, nous observons, comme pour les trois autres antennes déployées, que des phases secondaires cohérentes se propagent à travers l'antenne, contribuant ainsi à former la coda du train d'onde *P* et *S*. L'influence régionale doit donc également intervenir dans la propagation des ondes qui se propagent à travers cette antenne. Cependant, il reste difficile d'estimer la distance moyenne à laquelle se situent les hétérogénéités locales.

#### *Les effets propres à chacune des antennes Méailles, Allons et Saint-Benoît*

Nous avons montré que nous sommes capables de reconstruire des zones hétérogènes communes à partir des résultats obtenus indifféremment sur les antennes *Méailles*, *Allons* ou *Saint-Benoît*. Une importante zone de diffraction localisée dans les directions comprises entre  $N0^\circ$  et  $N45^\circ$  influence le champ d'onde qui se propage sur ces trois antennes. Cependant, on constate également qu'il existe des zones qui sont préférentiellement vues par l'une ou l'autre des antenne.

*Allons* : un premier point très important est que la contribution d'énergie que nous avons attribuée à des retro-propagations sur la faille de la *Moyenne Durance* doit principalement son existence à l'analyse des champs d'onde enregistrés par l'antenne *Allons*. Les antennes *Méailles* et *Saint-Benoît* ne montrent que très peu d'énergie se propageant depuis cette direction.

*Méailles* : les résultats des inversions des détections obtenues pour *Méailles* seul montre que cette antenne enregistre principalement de l'énergie en provenance des directions  $N0^\circ$  à  $N45^\circ$ . C'est cette zone qui semble renvoyer la plus grande quantité d'énergie. Les zones hétérogènes localisés précédemment au sud du dispositif restent globalement invisibles sur l'image que nous renvoie *Méailles* du milieu de propagation.

*Saint-Benoît* : pour cette antenne, la zone localisée à proximité de la faille de la *Moyenne Durance* renvoie également une quantité d'énergie, restant cependant sans commune mesure avec celle enregistrée par l'antenne *Allons*. Les structures topographiques localisées au sud du dispositif semblent également affecter les champs d'onde qui se propagent à travers cette antenne. De plus, des zones énergétiques qui n'apparaissait sur aucune autre antenne sont mises en évidence grâce à l'antenne *Saint-Benoît*. En effet, des quantités importantes d'énergie sont localisées sur une des bordures du dôme du *Barrot*, ainsi qu'entre ce dôme et l'*Argentera*. Ces deux zones n'étaient pas présentes sur l'image de reconstruction globale, parce que l'énergie qui leur est attribuée était trop faible par rapport au maximum d'énergie et ces zones ont donc été rejetées lors de l'application du seuil d'énergie.

Les reconstructions des zones hétérogènes du milieu de propagation, à partir des observations faites antenne par antenne, nous ont permis de mettre en évidence des zones communes où se focalise

l'énergie. De plus, nous avons également montré que certaines hétérogénéités semblent n'affecter que la propagation des ondes enregistrées par certaines antennes. Les observations sont donc fortement dépendantes de l'endroit où l'on se place. Cette situation est comparable à celle d'un rayon lumineux qui en se réfléchissant sur un miroir parviendrait à nous éblouir. Il suffit alors de se déplacer légèrement (ou de changer légèrement l'orientation du miroir) pour que la trajectoire de ce rayon lumineux soit évitée. Dans l'étude de la propagation des ondes sismiques en milieu hétérogène, les diffracteurs peuvent être considérés comme une succession de miroirs, qui renvoient de l'énergie dans des directions préférentielles de l'espace. Ceci avait déjà été mis en évidence lors de l'analyse des signaux synthétiques où lorsque l'on modifiait la position de l'antenne dans le milieu de propagation, l'énergie liées aux phases diffractées par chacune des hétérogénéités avait considérablement été modifiée.

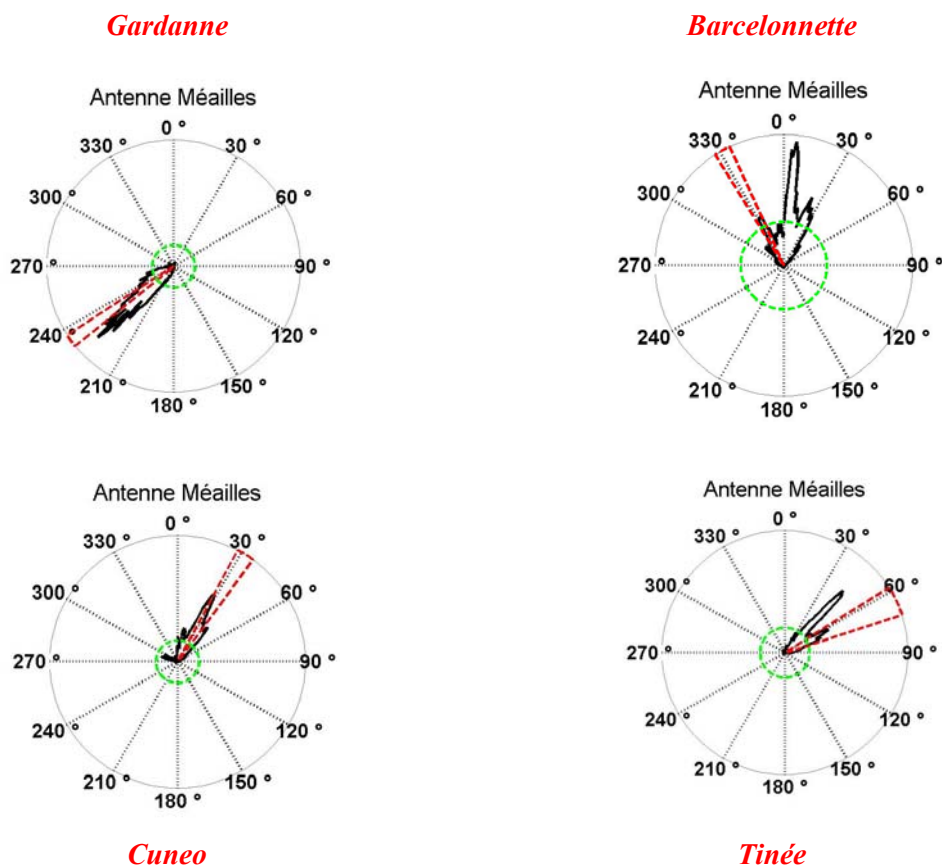
### 4.2.3. Influence de la position relative séismes-antennes sur la nature des phases diffractées

Dans un premier temps, nous avons commencé par analyser le résultat global, issu de l'ensemble des données enregistrées par les quatre antennes pendant cette expérience. Ensuite, nous nous sommes intéressés aux types d'hétérogénéités que permettait de voir chacune des antennes. Nous allons à présent encore augmenter l'échelle avec laquelle nous analysons nos données, en étudiant pour chaque antenne, les informations qu'apporte l'analyse des différents groupes d'événements. Est-ce que les zones hétérogènes globalement mises en évidence dans notre domaine d'étude le sont également en analysant chacun des événements enregistrés par une même antenne ? Y'a-t-il une systématique dans les phases secondaires présentes sur les sismogrammes enregistrés pour l'ensemble des événements appartenant à un même groupe ?

**Méailles** : nous avons représenté (**Fig. 4-15**) les statistiques sur les distributions énergétiques des directions de propagation, pour les trois principaux groupes d'événements analysés (*Gardanne*, *Barcelonnette* et *Tinée-Cuneo*). Ces distributions statistiques ont été calculées en moyennant les distributions énergétiques normalisées obtenues à partir de l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde de chaque événement du groupe. La rosace utilisée pour cette représentation a donc un rayon égal à 1. Si l'amplitude d'un pic d'énergie est proche de 1, cela signifie que la direction correspondante est présente sur la plupart des événements du groupe étudié. Le cercle en pointillé vert admet pour rayon  $1/N$ , où  $N$  est le nombre d'événements du groupe. Un pic d'amplitude inférieure à  $1/N$  n'est donc caractéristique que d'un seul événement du groupe. L'ouverture angulaire représentée en trait pointillé rouge représente l'étendue spatiale des épicentres du groupe d'événements étudié, vue depuis l'antenne *Méailles*.

Nous avons, pour présenter ces résultats, séparé le groupe *Tinée-Cuneo* en deux groupes suivant que la direction théorique de propagation est plus proche de  $30^\circ$  (pour le groupe *Cuneo*) ou  $60^\circ$  (pour le groupe *Tinée*). Contrairement aux inversions qui ont été faites précédemment, les contributions énergétiques se propageant suivant la direction de la source n'ont pas été supprimées.

Pour l'antenne *Méailles*, différents cas de figures sont observés : le groupe *Gardanne*, ainsi que le groupe *Cuneo* présentent des directions de propagation proches de celles de la source. L'essentiel des arrivées secondaires se propage, pour ces deux groupes, selon des directions qui lient les épicentres à l'antenne.



**Fig. 4-15 :** Statistiques sur les distributions d'énergie en fonction des directions de propagation, pour les événements des groupes *Gardanne*, *Barcelonnette*, *Cuneo* et *Tinée*, lorsqu'ils sont enregistrés par l'antenne *Méailles*.

Le groupe *Barcelonnette* est différent, en ce sens que la direction de la source n'est pas ici la direction la plus énergétique de la distribution. Deux directions privilégiées de l'énergie apparaissent selon des azimuts qui sont proches de N5° et N30°. Ces deux directions correspondent également à celles des zones hétérogènes qui avaient été localisées au N-E (faille du *Parpaillon* et faille de *Demandols* ou massif de l'*Argentera*) du dispositif lors de la reconstruction globale. Enfin, le groupe *Tinée*, pour lequel les azimuts théoriques de propagation se situent autour de N60°, admet également un azimut secondaire présentant une énergie plus importante que celle liée à la source. Cette direction secondaire pointe également dans une direction similaire à celle de la zone hétérogène qui avait été mise en évidence lors de la reconstruction globale. La zone hétérogène localisée au N-E du dispositif n'a donc pas été seulement imagée à partir des séismes localisés dans cette même direction (c'est à dire les séismes du groupe *Cuneo*), mais également par les séismes du groupe *Barcelonnette* et du groupe *Tinée*, pourtant localisés dans des azimuts très différents.

**Saint-Benoît :** pour cette antenne, nous avons noté qu'une certaine quantité d'énergie avait été localisée au niveau du dôme du *Barrot* ainsi qu'entre ce dôme et le massif de l'*Argentera*. Le groupe *Tinée*, dont les épicentres sont localisés dans une direction environ égale à N60° présente deux directions privilégiées de propagation de l'énergie. La première est localisée dans la fourchette

azimutale correspondant à la localisation globale des séismes et la deuxième est légèrement supérieure à N60°. Si on considère à présent les événements du groupe *Cuneo*, localisés dans une direction proche de N30°, on constate d'une part qu'une certaine quantité d'énergie est également localisée dans la direction de la source, mais qu'une deuxième direction privilégiée autour de N60° est également présente. Un élément 'perturbateur' dans la propagation des ondes semble donc être localisé dans cette direction N60°. Cette direction est également celle dans laquelle se trouve le dôme du *Barrot*, vue depuis l'antenne *Saint-Benoît*. Lors de la reconstruction des zones hétérogènes à partir des observations réalisées sur cette antenne, nous avons localisé une quantité d'énergie dans cette direction, qui est certainement sous-estimée. En effet, lors de cette reconstruction, nous avons éliminé l'influence de la source en ne tenant pas compte des détections dont la direction de propagation est au moins différente de 10° de celle de la direction théorique de propagation des ondes. Pour le groupe *Tinée*, pour lequel un important diffracteur semble être présent entre les épicentres des séismes et l'antenne *Saint-Benoît*, nous avons alors également éliminé un ensemble de détections localisés au niveau du dôme du *Barrot*, qui présentent elles aussi une direction de propagation proche de celles des épicentres.

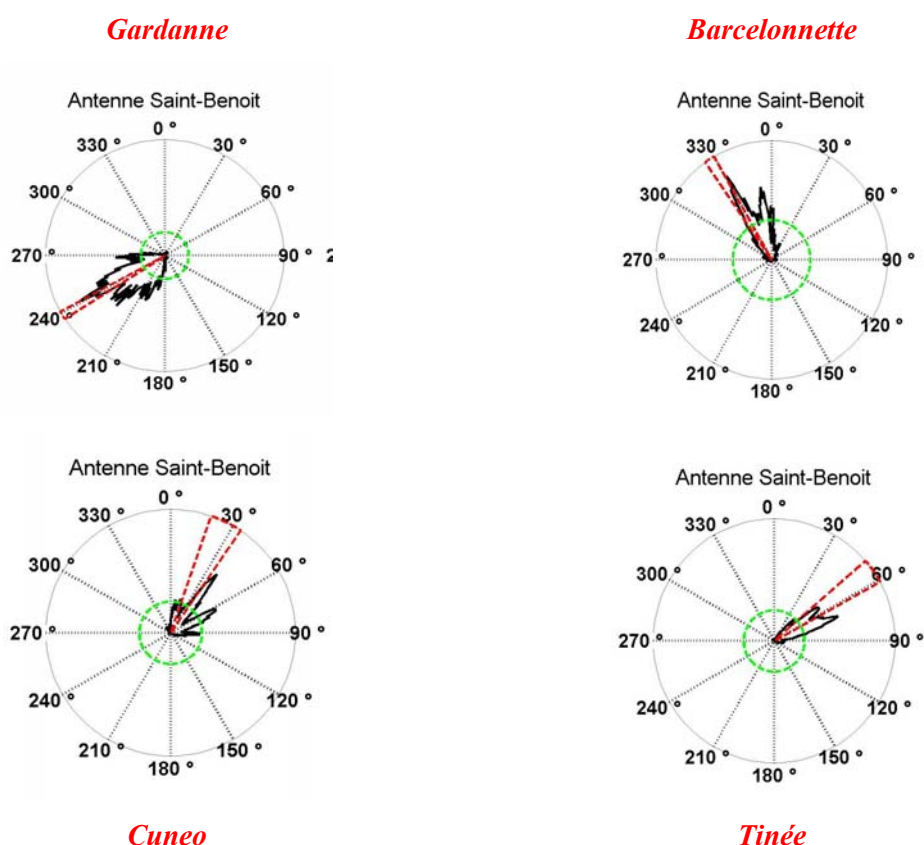


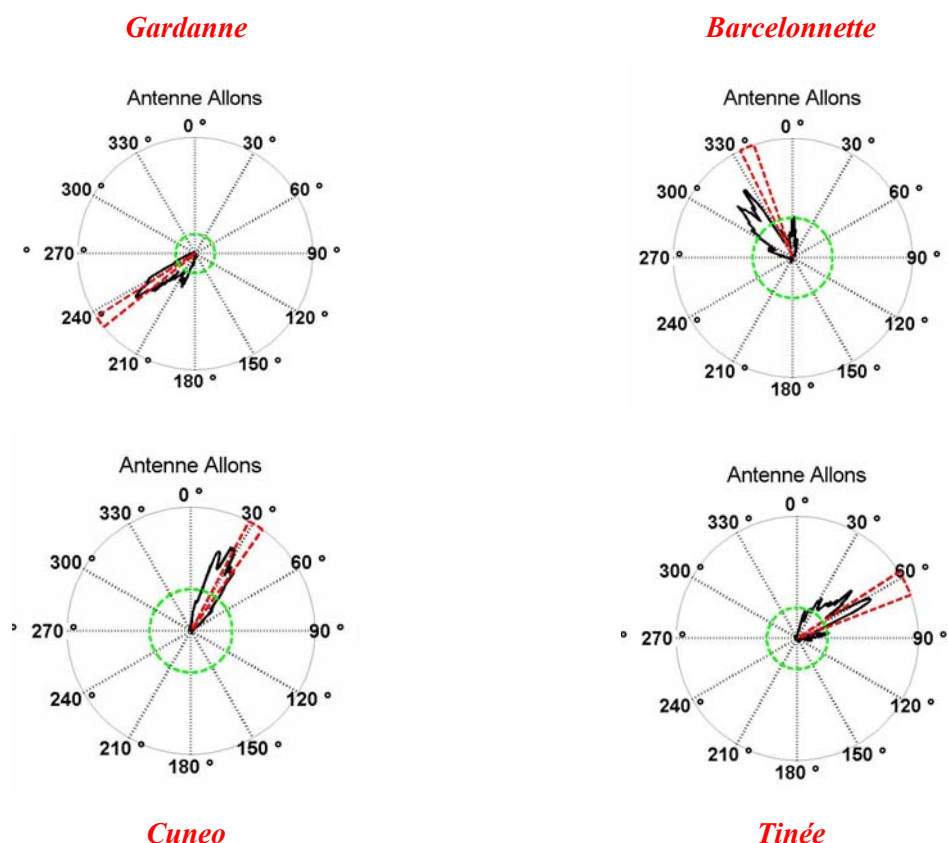
Fig. 4-16 : Statistiques sur les distributions d'énergie en fonction des directions de propagation, pour les événements des groupes *Gardanne*, *Barcelonnette*, *Cuneo* et *Tinée*, lorsqu'ils sont enregistrés par l'antenne *Saint-Benoît*.

Les résultats statistiques obtenus à partir du groupe *Barcelonnette* montrent que l'influence de la source est pour cette antenne supérieure à celle qui avait été observée pour l'antenne *Méailles*. Un pic secondaire d'énergie est également présent dans une direction proche de  $N0^\circ$ . Les phases diffractées se propageant selon cette direction sont celles qui ont permis de localiser la zone hétérogène au niveau de la faille du *Parpaillon*.

La statistique des distributions énergétiques des événements du groupe *Gardanne* met en évidence une direction principale proche de celle de la source. Cette direction principale s'accompagne d'une série d'azimuts secondaires énergétiques dont les directions sont comprises entre  $N180^\circ$  et  $N270^\circ$ . Ces directions n'ont pas été observées sur les antennes *Méailles* et *Allons* et sont certainement à attribuer à des effets très locaux au site d'enregistrement. Cette dernière remarque avait déjà été faite lorsque pour l'événement *Gardanne1*, nous avons observé que dans le train d'onde *S*, de nombreuses phases se propagent à travers l'antenne *Saint-Benoît* avec des vitesses apparentes élevées.

*Allons* : pour les groupes *Tinée*, *Cuneo* et *Gardanne*, l'antenne *Allons* présente un comportement assez similaire à l'antenne *Méailles*. L'essentiel de l'énergie est enregistré selon la direction de la source, , pour le groupe *Gardanne* et *Cuneo*. Le groupe *Tinée* permet quant à lui, de mettre en évidence deux directions de propagation privilégiées de l'énergie, la première dans la direction de la source et la deuxième dans une direction proche de  $N45^\circ$ , comme cela a été observé pour l'antenne *Méailles*.

Le groupe le plus troublant, pour cette antenne, est celui de *Barcelonnette*. Nous rappelons que ce groupe est composé de trois événements, dont deux d'entre eux forment un doublet. La statistique obtenue sur les directions de propagation permet de mettre en évidence deux directions principales de propagation de l'énergie. Les deux événements du doublet génèrent deux pics dans des directions comprises entre  $N310^\circ$  et  $N320^\circ$ . Pour ces deux événements, aucune phase diffractée n'a été enregistrée depuis les directions N-NE, directions qui sont pourtant énergétiques, voir prépondérantes sur les antennes *Saint-Benoît* et *Méailles*. C'est donc l'énergie associée à ce doublet, enregistré sur l'antenne *Allons*, qui est principalement responsable des phases diffractées depuis les directions N-O, que nous avons attribuées à la faille de la *Moyenne Durance*. Pour le troisième événement de ce groupe (*Barcelonnette3*), dont l'épicentre se situe à une dizaine de kilomètres de ceux du doublet, cette direction N-O est encore présente, mais l'essentiel de l'énergie se propage à présent selon la direction  $N0^\circ$ , identique à celle mise en évidence sur les antennes *Méailles* et *Saint-Benoît*.



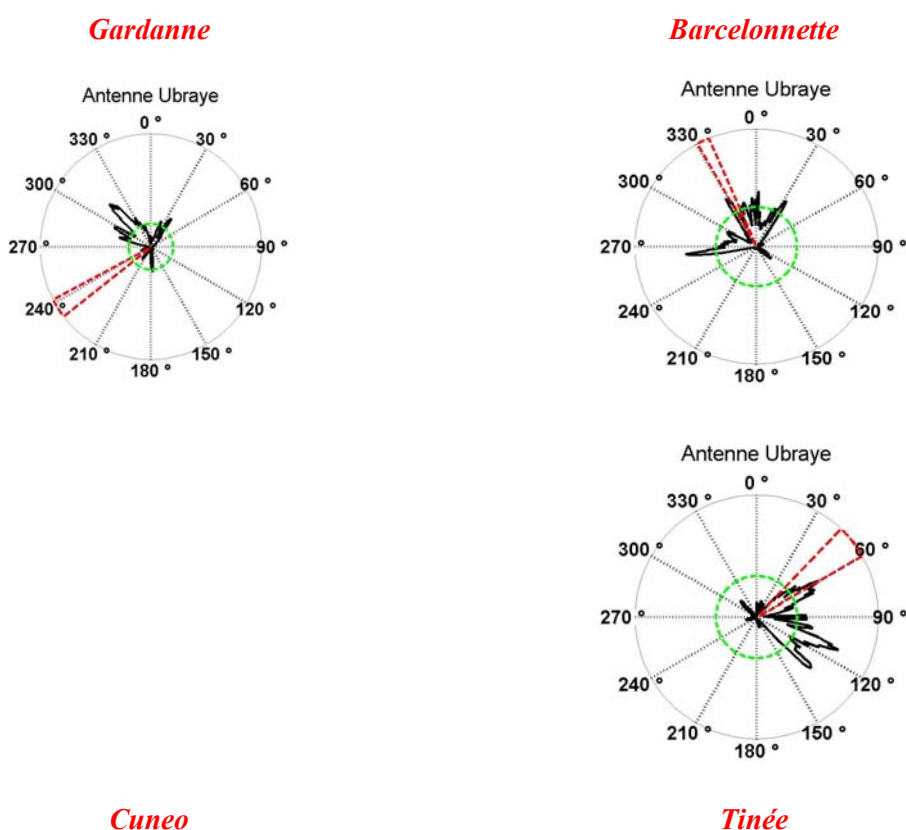
**Fig. 4-17 : Statistiques sur les distributions d'énergie en fonction des directions de propagation, pour les événements des groupes *Gardanne*, *Barcelonnette*, *Cuneo* et *Tinée*, lorsqu'ils sont enregistrés par l'antenne *Allons*.**

Nous observons donc que la variation dans la position de la source suffit à exciter des diffracteurs différents pour les trois événements de ce groupe. Cette variation est de l'ordre de 10 kilomètres, distance du même ordre de grandeur que celle qui sépare deux antennes quelconques déployées à *Annot*. De même qu'il a été mis en évidence que pour un séisme donné, les quatre antennes enregistrent des champs d'onde qui ont été influencés par des hétérogénéités différentes, les champs d'onde émis par deux séismes dont les épicentres sont situés à quelques kilomètres et enregistrés par une même antenne peuvent eux aussi avoir échantillonné des zones différentes de la croûte terrestre. On met ici en évidence la réciprocité qui existe entre d'une part les différents séismes d'un même groupe enregistrés par une seule antenne et d'autre part, le même séisme enregistré par des antennes différentes.

Non seulement la nature des phases diffractées varie lorsqu'on considère des groupes d'événements situés dans des azimuts très différents, mais en outre, les séismes appartenant à un même groupe d'événements peuvent eux aussi présenter de fortes différences du point de vue des phases les plus énergétiques qui composent la coda des sismogrammes.

**Ubraye** : Nous avons déjà montré que pour ce groupe, les influences locales étaient largement prédominantes. Pour les trois groupes d'événements présentés **Fig. 4-18**, seul le groupe *Barcelonnette* enregistre de l'énergie dans la direction de la source des séismes. Pour le groupe *Gardanne*, trois directions privilégiées sont présentes : N30°, N320° et N180°. Pour le groupe *Tinée*, ces directions ne sont pas retrouvées et l'essentiel de l'énergie se propage à présent selon la direction N120°. Une contribution d'énergie importante est également détectée dans une direction méridionale à celle de la source. Enfin, pour le groupe *Barcelonnette*, certaines de ces directions sont retrouvées mais la plus grande quantité d'énergie se propage selon une direction proche de N270°.

Si nous avons montré que pour l'ensemble des séismes enregistrés par cette antenne, les effets locaux sont prédominants, nous n'observons pas de directions systématiques et redondantes dans lesquelles se propage l'ensemble des phases diffractées et enregistrées par cette antenne. Les caractéristiques avec lesquelles ces phases se propagent sont donc fortement dépendantes de la façon dont le milieu est éclairé.



**Fig. 4-18** : Statistiques sur les distributions d'énergie en fonction des directions de propagation, pour les événements des groupes *Gardanne*, *Barcelonnette* et *Tinée*, lorsqu'ils sont enregistrés par l'antenne *Ubraye*. Pour le groupe *Cuneo*, aucun événement n'a pu être analysé avec l'antenne *Ubraye*.

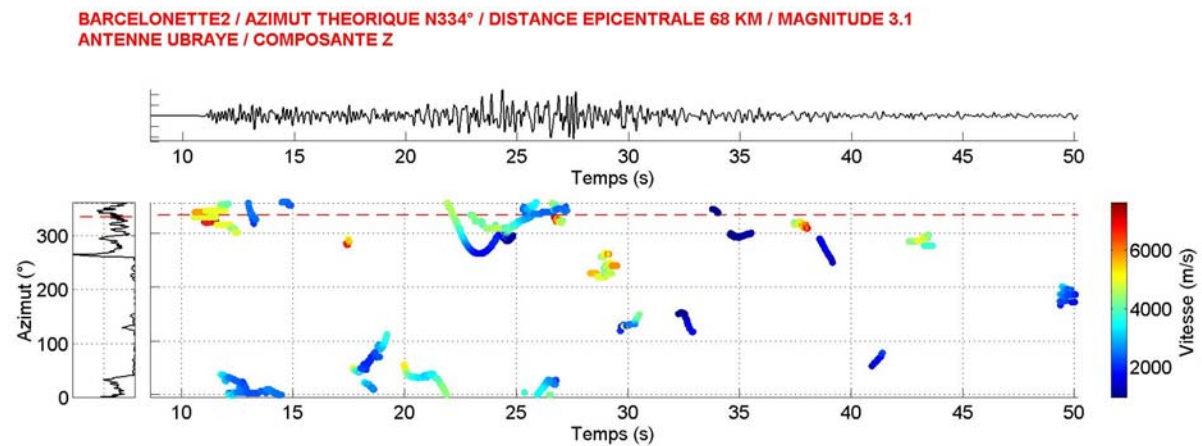
Cependant, sur quelques séismes singuliers, n'appartenant pourtant pas au même groupe d'événements, nous avons observé des caractéristiques similaires dans l'évolution des paramètres de propagation, notamment dans le train d'onde *S*. Les évolutions temps-azimuts-vitesses ont été



calculées pour les signaux enregistrés par *Ubraye*, lors des événements *Gardanne6* (Fig. 4-19-(b)) et *Barcelonnette2* (Fig. 4-19-(a)).

Pour l'événement *Barcelonnette2*, entre 20 et 25 sec. et pour l'événement *Gardanne6*, entre 34 et 40 sec., le train d'onde *S* présente une variation continue des azimuts, depuis N50° jusqu'à N280°. Cette variation d'azimut est observée pour deux événements qui admettent pourtant des directions théoriques très différentes (N334° et N238°). Ce résultat met encore en évidence la signature locale forte de cette antenne. Dans certains cas, comme pour *Barcelonnette3*, une quantité importante d'énergie est cependant réémise depuis la source sismique. Dans d'autre cas, comme pour *Gardanne6*, l'énergie associée à la direction théorique de l'événement est complètement masquée par celle associée aux phases diffractées localement.

(a)



(b)

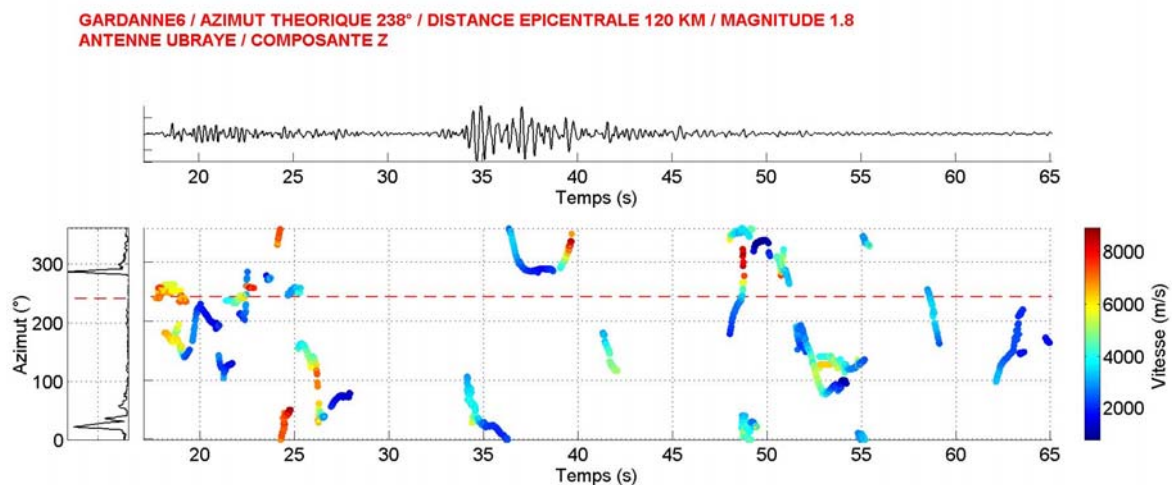


Fig. 4-19 : Evolution temporelle des paramètres de propagation pour les événements *Barcelonnette2* et *Gardanne6* enregistrés par l'antenne *Ubraye*.

### 4.3. Conclusions sur l'étude des signaux réels

La décomposition temps-fréquence-nombre d'onde appliquée à l'étude des signaux réels a montré qu'à partir de l'enregistrement multi-composantes des sismogrammes régionaux, on est capable d'accéder à une évolution détaillée des paramètres de propagation des différentes phases énergétiques et cohérentes qui se propagent à travers une antenne.

Un ensemble de 23 séismes enregistrés pendant la campagne d'*Annot* a été analysé. La façon dont nous avons appliqué la méthode de décomposition temps-fréquence-nombre d'onde à l'analyse des données réelles a d'abord été présentée sur un événement particulier enregistré pendant l'expérience (*Gardanne1*).

L'application de la méthode nous a permis de mettre en évidence une certaine cohérence dans la coda des sismogrammes. Des phases déterministes, générées par la diffraction et la réfraction du champ d'onde directe sur les différentes hétérogénéités du milieu de propagation, sont donc présentes dans la coda des sismogrammes régionaux.

Nous avons ensuite montré comment, en première approximation, par une méthode d'inversion basée sur l'hypothèse du *single-scattering*, il était possible de se servir de ces évolutions pour localiser les zones hétérogènes du milieu de propagation. Les résultats montrent qu'au moins une partie de l'énergie contenue dans les signaux peut être expliquée par le modèle simple de propagation utilisé. Statistiquement, à partir de l'ensemble des séismes enregistrés par les différentes antennes, trois zones hétérogènes privilégiées situées à distance régionale du dispositif global d'enregistrement, ont pu être mises en évidence dans le milieu de propagation. Les études géologiques faites sur la région nous ont permis d'attribuer les diffractions observées à trois zones structurales entourant notre domaine d'étude : (1) la faille du *Parpaillon* (au nord) et la faille de *Demandols* ou le massif de l'*Argentera* (au N-E), (2) les reliefs topographiques orientés globalement E-O (au sud) et (3) la faille de la *Moyenne Durance* (au N-O). Des effets de propagation très locaux à chacune des antennes ont également été mis en évidence.

Ceci montre que même lorsque le milieu de propagation est très hétérogène, une vision statistique des phases diffractées qui se propagent à travers chaque antenne permet de retrouver des constantes d'observation. Ce résultat est important car il prouve que le déploiement de plusieurs antennes, dans une zone géographique restreinte, permet de retrouver les zones de diffraction régionale du champ d'onde.

Nous avons également reconstruit ces zones hétérogènes à partir des observations réalisées individuellement par chaque antenne.

Nous avons ainsi montré que malgré la faible distance qui sépare les antennes (environ une dizaine de kilomètres), seulement certaines des structures précédentes sont communes à la vision qu'a chaque antenne du milieu de propagation (faille du *Parpaillon* et faille de *Demandols* ou massif de l'*Argentera*) alors que d'autres sont caractéristiques des observations réalisés à partir d'une seule antenne (Faille de la *Moyenne Durance*, dôme du *Barrot*).

De la même manière, les hétérogénéités sur lesquelles le champ d'onde incident se diffracte avant d'être réémis en direction de chacune des antennes, peuvent également être différentes lorsque l'on fait varier la position de l'hypocentre de seulement quelques kilomètres (groupe *Barcelonnette* sur l'antenne *Allons*).

Ce travail nous a donc enseigné que l'effet propre à chaque diffracteur du milieu de propagation est très largement dépendant de la configuration géométrique dans laquelle se trouve la source sismique, le diffracteur et l'antenne d'observation.

Enfin, nous avons également mis en évidence, pour l'antenne *Ubraye*, que la structure locale du site d'enregistrement conditionne très fortement les phases secondaires présentes dans les enregistrements régionaux du champ d'onde. Pour cette antenne située sur un plateau sommital, l'effet de site local oblitère partiellement, voire complètement la signature régionale des champs d'onde qui s'y propagent.

En terme de risque sismique, l'observation des champs d'onde à partir des antennes est également importante, puisqu'elle permet une estimation de l'effet de site induit par la présence des structures hétérogènes du milieu de propagation, à la fois situées à distances locales et régionales du point d'enregistrement.



## ***CONCLUSION GENERALE***

Dans ce travail, nous avons utilisé les observations obtenues sur des antennes sismologiques pour étudier la coda des sismogrammes régionaux. Nous avons alors comme objectifs principaux :  
Le **développement** d'un outil d'analyse haute-résolution des sismogrammes enregistrés par une antenne de capteurs, nous permettant :

- L'**identification** des phases énergétiques et cohérentes du sismogramme
- La **caractérisation** de chacune de ces phases en terme de paramètres de propagation (directions et vitesses apparentes de propagation à travers l'antenne)
- L'**interprétation** de l'évolution temps-azimut-vitesse des signaux dans le but de relier les phases de la coda avec les zones hétérogènes du milieu de propagation

La description détaillée des phases de la coda permet d'affiner la compréhension des processus de propagation des ondes sismiques, en milieu hétérogène. Ces phases sont importantes puisque l'énergie globale qui leur est associée peut représenter une quantité d'énergie supérieure à celle que véhicule le champ d'onde direct. En terme d'évaluation de l'effet de site, les phases secondaires ne peuvent donc pas être négligées et il est important de comprendre et d'identifier la nature des structures responsables de leur existence.

En milieu hétérogène, les ondes incidentes émises lors d'un séisme subissent de nombreuses déformations au cours de leur propagation. Ces ondes sont alors diffractées et réfractées par les structures hétérogènes qu'elles rencontrent, avant d'être réémises notamment dans la direction de l'antenne. Il en résulte des sismogrammes présentant une coda complexe, caractérisée par la présence simultanée de nombreuses composantes ondulatoires.

Les approches statistiques ont été les plus utilisées pour caractériser la coda des sismogrammes régionaux. La décroissance d'énergie de la coda permet en effet d'estimer le facteur de qualité, qui traduit le degré d'hétérogénéité moyen du milieu de propagation.

Dans ce travail, un point de vue déterministe de la description de la coda a été adopté et nous avons alors décomposé les différents trains d'onde enregistrés par une antenne sismologique, en une somme d'ondes planes, chacune étant décrite par un temps d'arrivée, un contenu fréquentiel, une direction et une vitesse apparente de propagation.

Devant la complexité que présente la coda des sismogrammes régionaux, les traitements classiques souffrent d'un manque de résolution et ne suffisent plus à caractériser la propagation de chaque phase cohérente qui se propage à travers une antenne.

Les développements méthodologiques ont permis de mettre au point une technique de décomposition temps-fréquence-nombre d'onde haute résolution des sismogrammes enregistrés par une antenne. Cette décomposition permet une description détaillée de l'évolution temporelle des paramètres de propagation des différentes phases cohérentes du sismogramme. Nous avons notamment construit un critère original permettant l'estimation du nombre de phases de même contenu fréquentiel, qui se propagent simultanément à travers l'antenne. Ce critère est basé sur la reconstruction a posteriori des formes d'onde analysées, à partir des paramètres de propagation retrouvés par la décomposition temps-fréquence-nombre d'onde.

La mise en pratique sur différents cas synthétiques simples (propagation d'une onde plane à travers l'antenne) a montré :

- (1) sa supériorité à caractériser les paramètres de propagation des champs d'ondes corrélées qui se propagent simultanément à travers l'antenne
- (2) l'efficacité du critère de reconstruction d'énergie, pour l'estimation du nombre de phases à une fréquence donnée, présentes dans la même fenêtre d'analyse temporelle.

L'application de cette méthode de décomposition à l'analyse de signaux simulés numériquement nous a permis de tester son pouvoir de résolution dans la description des paramètres associés à la propagation d'un champ d'ondes en milieu hétérogène. La méthode de décomposition temps-fréquence-nombre d'onde développée ainsi que l'utilisation du critère du maximum d'énergie expliquée ont été validés.

De plus, l'analyse de ces signaux synthétiques montre que la quantité d'énergie prépondérante n'est pas toujours véhiculée par les phases directes émises depuis la source sismique mais par les phases diffractées par les différentes hétérogénéités du milieu de propagation.

D'autre part, nous avons démontré que l'énergie associée au champ d'onde diffracté par chacune des hétérogénéités est fortement dépendante de la position de l'antenne dans le milieu.

Enfin, les zones de diffraction du milieu de propagation ont pu être reconstruites, à partir des évolutions temps-azimuts-vitesse caractérisant les signaux. Cette reconstruction nous a permis de rattacher les incertitudes sur la position de chacun des diffracteurs à la complexité des signaux analysés.

Les signaux réels auxquels nous nous sommes intéressés sont issus de l'expérience d'*Annot*, où les champs d'onde locaux ont été enregistrés par quatre antennes de faible ouverture (250 mètres). A partir des résultats obtenus de l'analyse des données, nous avons pu localiser les principales zones hétérogènes qui ont affecté la propagation des champs d'onde enregistrés par chaque antenne.

### ***Les observations***

Des zones de diffraction **communes** aux trois antennes *Méailles*, *Allons* et *Saint-Benoît* sont localisées à distance régionale (entre 10-40 kilomètres) des dispositifs et correspondent à des structures géologiques identifiées par ailleurs. La faille du *Parpaillon*, située à une trentaine de kilomètres au nord des dispositifs, ainsi que la faille de *Demandols* et le massif de l'*Argentera*, situés au N-E des dispositifs sont identifiés comme des zones hétérogènes du milieu de propagation, affectant fortement la propagation des ondes dans le milieu.

Des zones de diffraction **singulières**, propres à chaque antenne ont également pu être localisées à distance régionale. Le dôme du *Barrot* affecte principalement les champs d'onde enregistrés par l'antenne *Saint-Benoît*, alors que la faille de la *Moyenne Durance* affecte d'avantage ceux enregistrés par l'antenne *Allons*. Les structures topographiques situées au sud des dispositifs influencent, quant à elles, essentiellement, la propagation des champs d'ondes enregistrés par les antennes *Saint-Benoît*, *Allons* et *Ubraye*, mais leur signature est moins présente que pour ceux enregistrés par *Méailles*.

Cette dernière observation montre que la nature des phases secondaires du sismogramme est largement dépendante de la position relative des antennes par rapport aux différentes structures hétérogènes du milieu de propagation.

La quatrième antenne, *Ubraye*, déployée sur un plateau sommital, présente un comportement significativement différent des trois autres. Aucun des effets régionaux mis en évidence à partir de *Méailles*, *Allons* et *Saint-Benoît*, n'a été observé sur les champs d'ondes enregistrés par *Ubraye*. De forts **effets locaux** (distance < 5 kilomètres) oblitèrent partiellement, voire totalement, la signature régionale du champ d'ondes.

Nous avons ainsi observé que pour un même séisme (distance épacentrale ~50 kilomètres), les phases diffractées et enregistrées par deux antennes localisées à une dizaine de kilomètres, ne sont pas cohérentes. De façon similaire, pour deux séismes, dont les épicentres sont distants d'une dizaine de kilomètres, les phases diffractées et enregistrées par une même antenne, ne sont pas cohérentes. Cette observation montre qu'à l'échelle locale, une petite variation de la source sismique ou de la position de l'antenne, suffit pour que le champ d'ondes excite des diffracteurs différents au cours de sa propagation.

### ***Les enseignements***

En tout premier lieu, ce travail nous a permis de montrer qu'il existe une structure déterministe dans la coda des sismogrammes régionaux. A condition d'utiliser des outils de mesures adaptés (antennes de faible ouverture) et de mettre en œuvre une méthode d'analyse haute résolution des sismogrammes, il devient possible d'obtenir une caractérisation fine de l'évolution des paramètres de propagation des phases de la coda, même lorsque le milieu de propagation présente de fortes complexités structurales.

Ensuite, l'ensemble de nos observations nous permet de montrer que les techniques d'antenne sont des outils efficaces et prometteurs pour la caractérisation des structures hétérogènes du milieu de propagation.

De plus, la variabilité des diffracteurs mis en évidence à partir des signaux enregistrés d'une antenne à une autre nous apprend qu'il faut rester prudent face à l'interprétation régionale d'un phénomène observé localement.

Enfin, la forte signature régionale du champ d'ondes nous montre qu'en terme d'évaluation du risque sismique lié à un site, il est primordial de prendre en compte les influences des structures régionales, au risque de largement sous-estimer l'effet de site en cas de forts séismes.



## ***PERPECTIVES***

L'ensemble des conclusions de ce travail nous permet de tracer les pistes futures quant à la l'étude de la propagation des ondes en milieu hétérogène, à partir des antennes sismologiques.

### **➤ *Observations multi-antennes***

Les observations réalisées lors de l'expérience d'*Annot* ont montré que les signaux enregistrés par des antennes de faible ouverture situées à une dizaine de kilomètres de distance ne présentaient plus de cohérence au niveau de la forme d'onde. La taille caractéristique des objets hétérogènes du milieu de propagation est de l'ordre de 5 à 10 kilomètres, du même ordre de grandeur que celle qui sépare les différentes antennes. Pour les expériences multi-antennes futures, il faudrait alors envisager un dispositif dont l'ouverture globale serait plus faible. Ainsi cela vérifierait que les signaux enregistrés par les différentes antennes présentent bien une cohérence globale et que l'image que nous renvoient les ondes du milieu de propagation est homogène. La distance, sur laquelle la déformation du champ d'onde est négligeable, pourrait alors être estimée (rapport longueur d'onde / distance de propagation). De plus, il serait également intéressant d'englober l'ensemble du dispositif multi-antennes par une nappe de capteurs large-bande, nous permettant ainsi de faire le lien dans la propagation des phases diffractées, d'une antenne à une autre.

Une antenne de configuration géométrique originale a également été déployée à *Rustrel* (Laboratoire Souterrain à Bas Bruit) ouvrant de nouvelles perspectives en terme d'analyse des signaux sismologiques. Pour cette antenne, les capteurs sont situés dans des galeries souterraines et un capteur supplémentaire a été placé à l'aplomb de ces galeries. Ce type d'antenne permet d'avoir une vision 3D de la propagation des ondes. L'identification des effets induits par les 500 derniers mètres sur la propagation du champ d'ondes sera alors également possible.

### **➤ *Imagerie***

La technique d'inversion des zones hétérogènes, que nous avons utilisée dans ce travail, pourrait également être améliorée, notamment en localisant la profondeur des zones diffractantes du milieu. Les phases enregistrées à *Annot*, pour lesquelles les directions de propagation sont similaires sur au moins deux des quatre antennes, permettraient d'estimer cette profondeur. Ce type de technique, capable de retrouver la position des zones hétérogènes du milieu de propagation, est également intéressante pour la volcanologie, où un des objectifs est de caractériser la structure interne du volcan. Des ordres supérieurs de diffraction pourraient également être considérés pour la reconstruction des zones hétérogènes du milieu de propagation. Cependant, la prise en compte des diffractions multiples augmente considérablement le nombre d'inconnues du système, notamment celles sur les vitesses de propagation. Des zones de diffractions pourraient être fixées a priori dans le milieu et il serait intéressant de rechercher conjointement les vitesses de propagation et le nombre de diffractions qui permettraient d'expliquer au mieux nos données. Par exemple, dans le cas d'Ubraye, les points de diffraction pourraient être relocalisés par un processus de diffraction double, en imposant une première diffraction au N-E du dispositif, à l'endroit où sont identifiées les structures géologiques qui influencent les champs d'onde enregistrés sur les autres antennes.

#### ➤ *Tir de calibration*

La mise au point de ce type de technique d'imagerie nécessiterait également de parfaitement connaître la position de la source, par rapport au dispositif d'enregistrement. Il serait alors intéressant de réaliser une série de tirs de calibration tout autour de l'antenne, et de comparer la nature des phases diffractées présentes sur les enregistrements à celles enregistrées lors d'un séisme de localisation voisine. En particulier, la direction de propagation théorique de la source serait parfaitement connue et permettrait de connaître l'écart réel qui existe entre cette direction et celle retrouvée par l'analyse temps-fréquence-nombre d'onde.

#### ➤ *Effet de site*

Les techniques d'antennes sont des outils intéressants en terme d'évaluation du risque sismique d'une région donnée. Elles sont d'ailleurs de plus en plus utilisées dans ce domaine car le déploiement d'un dispositif multi-antennes permet, comme l'a montré cette étude, d'estimer séparément l'effet de site lié à des influences très locales de celui lié à des influences régionales.

#### ➤ *Apport du mouvement 3C*

Enfin, d'un point de vue méthodologique, le développement de techniques d'antenne permettant la prise en compte simultanée des trois composantes du mouvement du sol est déterminant pour les années à venir. Les observations montrent que les composantes horizontales ne sont pas soumises aux mêmes sollicitations que les composantes verticales, et contiennent donc une information

complémentaire concernant les structures hétérogènes du milieu de propagation. Non seulement la vitesse réelle de propagation de l'onde dans le milieu de propagation pourrait être identifiée, mais l'information supplémentaire apportée par les composantes horizontales offre également de grandes perspectives en terme de séparation d'onde. Des travaux récents relatifs à l'utilisation des quaternions pour la description simultanée des trois composantes du mouvement du sol (Le Bihan, 2001) sont prometteurs en terme de séparation d'onde.



# ***GLOSSAIRE MATHEMATIQUE***

$\vec{k}$	Vecteur nombre d'onde
$t$	Variable temporelle
$\vec{r}$	Vecteur position de chacun des capteurs de l'antenne
$\nu$	Fréquence temporelle
$\phi$	Phase temporelle
$c$	Vitesse de phase
$\theta$	Direction de propagation
$T$	Opérateur transposé
$*$	Opérateur transposé et complexe conjugué
$s(t, \vec{r})$	Evolution spatio-temporelle du signal
$S(t, \vec{r})$	Transformée de Fourier du signal $s(t, \vec{r})$
$\eta(t, \vec{r})$	Evolution spatio-temporelle du bruit de fond
$z(t, \vec{r})$	Signal analytique du signal $s(t, \vec{r})$
$RTF(t, \nu)$	Représentation Temps-Fréquence
$COH(t, \nu)$	Cohérence calculée localement autour du temps $t$ et de la fréquence $\nu$
$SM(t, \nu)$	Matrice spectrale calculée localement autour du temps $t$ et de la fréquence $\nu$
$N_{trace}$	Nombre de capteurs composant l'antenne
$\vec{a}(\vec{k})$	Vecteur propagateur, calculé pour chaque vecteur nombre d'onde $\vec{k}$
$E_s$	Sous-espace ' <i>signal</i> '
$E_n$	Sous-espace ' <i>bruit</i> '
$QEE$	Quantité d'énergie expliquée par la reconstruction des signaux
$G_{ij}$	Gain en énergie expliquée (%) lorsqu'on passe de la description du sous-espace ' <i>signal</i> ' avec $i$ vecteurs propres à celle avec $j$ vecteurs propres



## ***ANNEXE 1: Les différents estimateurs FK***

On désigne par  $s(t, \vec{r})$  le signal sismique enregistré par chacun des capteurs appartenant à l'antenne d'observation et  $S(v, \vec{r})$  sa transformée de Fourier à 1Dimension.  $\vec{r}$  désigne le vecteur position de chacun des capteurs.

On introduit également la matrice spectrale  $SM(v)$  dont les éléments  $ij$  ( $1 \leq i, j \leq N_{trace}$ ) sont définis par :

$$SM_{ij}(v) = S(v, \vec{r}_i) \cdot S^*(v, \vec{r}_j)$$

Éq. A1.2

et représentent les énergies d'interaction entre le capteur  $i$  et le capteur  $j$  à la fréquence  $v$ . La dimension de cette matrice est donc  $[N_{trace} * N_{trace}]$  et à chaque échantillon en fréquence correspond une matrice spectrale.

On définit le vecteur  $\vec{a}(\vec{k})$  que nous appellerons vecteur 'propagateur' par :

$$\vec{a}(\vec{k}) = \left[ \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r}_1) \quad \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r}_2) \quad \dots \quad \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r}_{N_{trace}}) \right]^T$$

Ce vecteur varie avec le vecteur nombre d'onde et a pour effet de décaler les signaux dans le domaine temporel d'une quantité  $(\vec{k} \cdot \vec{r}_i)$ .

### Estimateur de 'Retard-Sommation'

L'estimateur du spectre d'énergie FK par la méthode classique de 'retard-sommation' se définit par :

$$P_{BF}(\vec{k}, \nu) = \vec{a}(\vec{k})^* \cdot SM(\nu) \cdot \vec{a}(\vec{k})$$

Éq. A1.3

\* représente le vecteur complexe conjugué et  $^T$  le vecteur transposé.

### Estimateur ‘Haute-résolution’

#### ➤ Estimateur du ‘Minimum Variance’

L’estimateur du spectre d’énergie FK par la méthode haute-résolution au sens de Capon (1969) se définit par :

$$P_{HR}(\vec{k}, \nu) = \frac{1}{\vec{a}(\vec{k})^* \cdot [SM(\nu)]^{-1} \cdot \vec{a}(\vec{k})}$$

Éq. A1.4

#### ➤ Estimateur *MUSIC* (voir Éq. 2-14)



## ***REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES***

**Aki, K. et Tsujiura, M.**, 'Correlational study of near earthquake waves', *Bull. Earthq. Res. Inst.*, vol. 37, pp. 207-232, 1959.

**Aki, K.**, 'Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves', *Jour. Geophys. Res.*, vol. 74, no. 2, pp. 615-631, 1969.

**Aki, K. et Chouet, B.**, 'Origin of coda waves : Source, attenuation and scattering effects', *J. Geophys. Res.*, vol. 80, no. 23, pp.3322-3342, 1975.

**Aki, K.**, 'Scattering and attenuation of shear waves in the lithosphere', *J. Geophys. Res.*, vol. 85, no. B11, pp. 6496-6504, 1980.

**Almendros, J., Chouet, B. et Dawson, P.**, 'Array detection of a moving source', *Seism. Res. Letters*, vol. 73, no. 2, pp. 153-165, 2002.

**Bannister, S.C., Husebye, E.S. et Ruud, B.O.**, 'Teleseismic P coda analyzed by three-component and array techniques : Deterministic location of topographic P-to-Rg scattering near the NORESS array.', *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 80, no. 6, pp. 1969-1986, 1990.

**Barbé, J.F.**, 'Géométrie et cinématique du faisceau décrochant de Rouaine.', *D.E.A, Université de Nice*, 1992.

**Baroux, E.**, 'Tectonique active en région à sismicité modérée : Le cas de la Provence (France). Apport d'une approche pluridisciplinaire.', *Thèse de doctorat, Université de Paris-sud*, 2000.

**Baumgardt, D.R.**, 'Investigation of teleseismic Lg blockage and scattering using regional arrays.', *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 80, no. 6, pp. 2261-2281, 1990.

- Bouchon, M. et Aki, K.**, 'Discrete Wavenumber representation of seismic source wave fields.', *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 67, pp. 259-277, 1977.
- Bouchon, M.**, 'The complete synthesis of seismic crustal phases at regional distances', *J. Geophys. Res.*, vol. 87, no. B3, pp. 1735-1741, 1982.
- Campillo, M. et Plantet, J. L.**, 'Frequency dependence and spatial distribution of seismic attenuation in France : experimental results and possible interpretations.', *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol. 67, pp. 48-64, 1991.
- Cansi, Y.**, 'An automatic seismic event processing for detection and location : The P.M.C.C method', *Geophys. Res. Letters*, vol. 22, no. 9, pp. 1021-1024, 1995.
- Cansi, Y., Plantet, J-L., Massinon, B.**, 'Earthquake location applied to a mini-array : K-spectrum versus correlation method', *Geophys. Res. Letters*, vol. 20, no. 17, pp. 1819-1822, 1993.
- Capon, J.**, 'High-résolution frequency-wavenumber spectrum analysis', *Proc. IEEE*, vol. 57, no. 8, pp. 1408-1418, 1969.
- Claasen T.C.M. et Mecklenbrauker, W.F.G.**, 'On the time-frequency discrimination of energy distribution : can they look sharper than Heisenberg', *IEEE*, pp. 41B.7.1-41B.7.4, 1984
- Cornou, C.**, 'Contribution du traitement d'antenne et de l'imagerie sismique à la compréhension des effets de site dans l'agglomération grenobloise', *Thèse de doctorat*, Université Joseph Fourier, Grenoble I. 1996.
- Dainty, A.M. et Toksöz, M.N.**, 'Array analysis of seismic scattering', *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 80, no. 6, pp. 2242-2260, 1990.
- Dainty, A.M. et Schultz, C.A.**, 'Crustal reflections and the nature of regional P coda.', *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 85, no. 3, pp. 851-858, 1995.
- Delprat, N., Escudié, B., Guillemain, P., Kronland-Martinet, R., Tchamitchian, P. et Torrèsani, B.**, 'Asymptotic wavelet and Gabor analysis : Extraction of instantaneous frequencies', *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 38, no. 2, pp. 644-664, 1992.
- Douglas, A.**, 'Seismometer arrays – their use in earthquake and test ban seismology.', *AWE Blacknest*, Communication personnelle, 2002.
- Durand, S., Gaffet, S. et Virieux, J.** 'Seismic diffracted waves from topography using 3D discrete wavenumber - boundary integral equation simulations.', *Geophys.*, vol. 64, pp. 572-578, 1999.
- Dziewonski, A., Bloch, S. and Landisman, M.** 'A technique for the analysis of transient seismic signals', *Bull. Seis. Soc. Am.*, vol. 59, no. 1, pp. 427-444, 1969.
- Dziewonski, A. M., et Anderson, D. L.**, 'Seismic tomography of the Earth's interior', *Am., Sci.*, vol. 72, pp. 483-494, 1984.

**Flandrin, P. et Martin, N.**, 'Signaux non-stationnaires : analyse temps-fréquence et segmentation, Partie 1', *Traitement du signal*, supplément au vol. 9, 1992.

**Flandrin, P.** 'Temps-fréquence', *Série Traitement du Signal*, Collection Hermès, Paris, 1998.

**Gabor, D.**, 'Theory of communication', *J. IEE (London)*, vol. 93, pp. 429-457, 1946.

**Gaffet S.** 'Teleseismic waveform modeling including geometrical effects of superficial geological structures near to seismic sources.' *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 85, pp. 1068-1079, 1995

**Gaffet, S., Larroque, C., Deschamps, A. et Tressols, F.**, 'A dense array experiment for the observation of waveform perturbations', *Soil Dyn. Earth. Eng.*, vol. 17, pp. 475-484, 1998.

**Gao, L.S., Lee, L.C., Biswas, N.N. et Aki, K.**, 'Comparison of the effects between single and multiple scattering on coda waves for local earthquakes', *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 73, no. 2, pp. 377-389, 1983.

**Glangeaud, F. et Mari, J. L.**, 'Wave separation, Principle and methods', *Revue de l'institut français du pétrole*, vol. 48, no. 5, pp. 467-499, 1993.

**Glangeaud, F. Mari, J. L., Lacoume, J. L.**, 'Estimation de la matrice spectrale de signaux certains: Application à la séparation d'ondes en sismique.', *12<sup>ème</sup> colloque sur le traitement du signal et des images, (GRETSI)*, 12-16/06/1989, Juan-les-Pins.

**Goguel, J.** 'Description tectonique de la bordure des Alpes de la Bléone au Var.', *Mém. Serv. Carte géol. Fr.* 360 p., 1936.

**Goldstein, P. et Archuleta, R. J.**, 'Array analysis of seismic signals', *Geophys. Res. Letters*, vol. 14, no. 1, pp. 13-16, 1987.

**Gupta, I.N., Lynnes, C.S. et Wagner, R.A.**, 'Broadband F-K analysis of array data to identify sources of local scattering', *Geophys. Res. Letters*, vol. 17, pp. 183-186, 1990.

**Gupta, I.N., Lynnes, C.S. McElfresh, T.W. et Wagner, R.A.**, 'F-K analysis of Noress array and single station data to identify sources of near-receiver and near-source scattering', *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 80, no. 6, pp. 2227-2241, 1990.

**Harris, D.B.**, 'Comparison of the direction estimation performance of high-frequency seismic arrays and three-component stations.', *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 80, No. 6, pp 1951-1968, 1990.

**Herraiz, M. et Espinosa, A.F.**, 'Scattering and attenuation of high-frequency waves : development of the theory of coda waves.', *Department of the interior U.S. geological survey, Open-File Report 86-455*, 1986.

**Hlawatsch, F.**, 'Interference terms in the Wigner distribution', *Digital Signal Processing*, vol. 84, 1984.

**Hoshiba, M.**, 'Simulation of coda wave envelope in depth dependent scattering and absorption structure', *Geophys. Res. Letters*, vol. 21, no. 25, pp. 2853-2856, 1994.

- Husebye, E.S., Ingate, S. F. et Thoresen, E.,** ‘Seismic arrays for everyone’, *The VELA program: A twenty-five year review of basic research. Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)*. pp. 526-545, 1985.
- Kissling, E.,** ‘Geotomography with local earthquake data’, *Reviews of Geophys.*, vol. 26, no. 4, pp. 659-698, 1988.
- Kopnichev, Y.F.,** ‘The role of multiple scattering in the formation of seismogram’s tail.’, *Izv. Acad. Sci., USSR, Phys. Solid Earth*, vol. 13, pp. 394-398, 1977.
- Kvaerna, T. et Doornbos, D.J.,** ‘An integrated approach to slowness analysis with arrays and three-component stations’, *Semiannual technical summary*, Scientific report No. 2-85/86, pp. 60-69, 1986.
- Kvaerna, T. et Doornbos, D. J.,** ‘Scattering of regional Pn by moho topography.’, *Geophys. Res. Letters*, vol. 18, no. 7, pp. 1273-1276, 1991.
- Lacoss, T.,** ‘Data adaptive spectral analysis methods’, *Geophysics*, vol. 36, no. 4, pp. 661-675, 1971.
- Lambaré, G., Virieux, J., Jin, S., et Madariaga, R.,** ‘Iterative asymptotic inversion in the acoustic approximation’, *Geophys.*, vol. 57, pp. 1138—1154, 1992.
- Larroque C., Gaffet, S., Cornou, C., Schisselé, E., Bertrand, E., Béthoux, N., Bouchon, M., Corrazi, M., Courboux, F., Deschamps, A., Duval, A-M., Maron, C., Glot, J-P., Janod, F., Vidal, S., Virieux J.,** ‘Une expérience multi-antennes à Annot pour l’analyse des effets de site en sismologie.’, *C. R. Acad. Sciences*, vol. 329, pp. 167-174, 1999.
- Laurent, O.,** ‘Modalités de la structuration d’un prisme de front de chaîne : L’exemple de l’arc de Castellane (Chaînes subalpines méridionales, France).’, *Thèse de doctorat*, Université de Nice-Sophia Antipolis, 1998.
- Le Bihan, N.,** ‘Traitement algébrique des signaux vectoriels. Application en séparation d’ondes sismiques.’, *Thèse de doctorat*, INPG, 2001.
- Mallat, S.,** ‘A wavelet tour of signal processing’, *Academic Press*, 1999.
- Marcos, S.,** ‘Les méthodes à haute-résolution : traitement d’antenne et analyse spectrale’, *Série Traitement du Signal*, Collection Hermès, Paris, 1998.
- Margerin, L. et al.,** ‘Residence time of diffuse waves in the crust as a physical interpretation of coda Q : application to seismograms recorded in Mexico.’, *Geophys. J. Int.*, vol. 138, pp. 343-352, 1999.
- Mari, J.L., Glangaud, F. et Coppens, F.,** ‘Traitement du signal pour géologue et géophysiciens’, *Publications de l’institut français du pétrole, Ed. Technip*, 1997.
- Michaut, F.,** ‘Méthodes adaptatives pour le signal’, *Série Traitement du Signal*, Collection Hermès, Paris, 1992.
- Mykkeltveit, S.,** ‘A new regional array in Norway : Design work and results from analysis of data from a provisional installation’, *The VELA program : A twenty-five yaer review of basic research*, pp 546-553, 1984.

- Mykkeltveit, S., Astebol, K., Doornbos, D.J. et Husebye, E.S.**, 'Seismic array configuration optimization', *Bull. Seism. Am.*, vol. 73, pp. 173-186, 1983.
- Mykkeltveit, S., Ringdal, F., Kvaerna, T. et Alewine, R. W.**, 'Application of regional arrays in seismic verification research', *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 80, no. 6, pp. 1777-1800, 1990.
- Nawab, S.H., Dowla, F.U., Lacoss, R.T.**, 'Direction determination of wideband signals', *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-33, no. 4, pp. 1114-1122, 1985.
- Paul, A., Cattaneo, M., Thouvenot, F., Spallarossa, D., Bethoux, N. et Frechet, J.**, 'A three-dimensional crustal velocity model of the southwestern Alps from local earthquake tomography', *J. Geophys. Res.*, vol. 106, pp. 19367-19389, 2001.
- Ribodetti, A., Gaffet, S., Operto, S., Virieux, J. et Saracco, G.**, 'Asymptotic waveform inversion for unbiased velocity and attenuation measurements in viscoacoustic heterogeneities', (en préparation), 2002.
- Ritz, J.F.**, 'Tectonique récente et Sismotectonique des Alpes du Sud: Analyse en termes de contraintes.', *Quaternaire*, 3, (3-4), pp. 111-124, 1992.
- Ritz, J-F.**, 'Evolution du champ de contraintes dans les Alpes du Sud depuis la fin de l'Oligocène. Implications sismotectoniques', *Thèse Univ. Montpellier.*, 1991.
- Ryzhik, L., Papanicolaou, G.C., et Keller, J.B.**, 'Transport equation for elastic and other waves in random media.', *Wave motion*, vol. 24, pp. 327-370, 1996.
- Sato, H.**, 'Energy propagation including scattering effects single isotropic scattering approximation', *J. Phys. Earth*, vol. 25, pp. 27-41, 1977.
- Schmidt, R.O.**, 'Multiple emitter location and signal parameter estimation', *Proc. Of the RADC spectrum estimation workshop (2<sup>nd</sup>) Griffiss AirForce Base, NY, USA*, 1979.
- Schmidt, R.O. et Franks, R.E.**, 'Multiple source DF signal processing : an experimental system', *IEEE Trans. Ant. Prop.*, vol. AP-34, no. 3, pp. 281-290, 1986.
- Shapiro, N.M., Campillo, M., Margerin, L., Singh, S.K. Kostoglodov, V. et Pacheco, J.**, 'The energy partitioning and the diffusive character of the coda.', *Bull., Seism. Soc. Am.*, vol. 90, pp. 655-665, 2000.
- Siddans, A.W.B.**, 'Accurate fold and thrust patterns in the Subalpine Chains of Southeast France.', *J. Struct. Geol.*, 1, 2, pp. 117-126, 1979.
- Sue, C.**, 'Dynamique actuelle et récente des Alpes occidentales internes.', *Thèse de doctorat*, Université Joseph Fourier – Grenoble I, 1998.
- Suteau-Henson, A.**, 'Estimating azimuth and slowness from three-component and array stations.', *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 80, No. 6, pp 1987-1998, 1990.
- Toksöz, M.N. et al.**, 'A model for attenuation and scattering in the earth's crust', *Pageoph*, vol. 128, no. ½, pp. 81-100, 1988.

- Tressols, F.**, 'Détermination de l'évolution temporelle des vecteurs d'onde pour la détection d'arrivées multiples : L'analyse Temps-Fréquence-Vecteur d'onde', *Thèse de doctorat*, Université de Nice Sophia Antipolis, 1996.
- Truchetet, F.**, 'Ondelettes pour le signal numérique', *Série Traitement du Signal*, Collection Hermès, Paris, 1998.
- Ville, J.**, 'Théorie et applications de la notion de signal analytique', *Cables et Transmission*, vol. 2A, pp. 61-74, 1948.
- Wagner, S.W. et Langston, C.A.**, 'Body-to-surface-wave scattered energy in teleseismic coda observed at the NORESS seismic array.', *Bull. Seism. Soc. Am*, vol. 82, no. 5, pp. 2126-2138, 1992.
- Wagner, G.S. et Owens, T.J.**, 'Broadband bearing-time records of three-component seismic array data and their application to the study of local earthquake coda.', *Geophys. Res. Letters.*, vol. 20, no. 17, pp. 1823-1826, 1993.
- Wagner, G.S.**, 'Resolving diversely polarized, superimposed signals in three-component seismic array data.', *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 23, No. 14, pp 1837-1840, 1996.
- Wassermann, J. et Ohrnberger, M.**, 'Automatic hypocenter determination of volcano induced seismic transients based on wavefield coherence – an application to the 1998 eruption of Mt. Merapi, Indonesia', *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 110, pp. 57-77, 2001.
- Wax, M. et Kailath, T.**, 'Detection of signals by information theoretic criteria', *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-33, no. 2, 1985.
- Weaver, R.L.**, 'Diffusivity of infrasound in polycrystal', *J. Mech. Phys. Solids.*, vol. 38, pp. 55-86, 1990.
- Wigner, E.P.**, 'On the quantum correction for thermodynamic equilibrium', *Phys. Rev.*, vol. 40, pp. 749-759, 1932.
- Wu, R.S.**, 'Multiple scattering and energy transfer of seismic waves – separation of scattering effect and intrinsic attenuation – I. Theoretical modelling.', *Geophys. J. R. astr. Soc.*, vol. 82, pp. 57-80, 1985.
- Wu, R.S. et Aki, K.**, 'Multiple scattering and energy transfer of seismic waves – Separation of scattering effect from intrinsic attenuation. II. Application of the theory to Hindu Kush region.', *Pageoph*, vol. 128, no. ½, pp. 49-80, 1988.
- Zerva, A. et Zhang, O.**, 'Estimation of signal characteristics in seismic ground motions', *Prob. Eng. Mech.*, vol. 11, pp. 229-242, 1996.

